



Joona Tuikka

Injektoimattoman avoimen teräsporapaalun rakennetekninen kantavuus

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 21.3.2014

Valvoja: Professori Jari Puttonen, Aalto-yliopisto

Ohjaaja: Professori Leena Korkiala-Tanttu, Aalto-yliopisto

Tekijä Joona Tuikka		
Työn nimi Injektoimattoman avoimen teräsporapaalun rakennetekninen kantavuus		
Koulutusohjelma Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka		
Pää-/sivuaaine Rakennetekniikka	Professuurikoodi Rak-54	
Työn valvoja Professori Jari Puttonen, Aalto-yliopisto		
Työn ohjaaja Professori Leena Korkiala-Tanttu, Aalto-yliopisto		
Päivämäärä 21.3.2014	Sivumäärä 126 + 65	Kieli suomi

Tiivistelmä

Injektoimattoman poikkileikkaukseltaan avoimen teräsporapaalun kantavuuden määrittäminen poikkeaa tavanomaisista putkimaisista paaluprofiileista. Avonaisille poikkileikkauksille ominaista on putkiprofiileja heikompi vääntö- ja nurjahduskestävyys. Poikkileikkauksen avonaisuudesta johtuen avoprofiilinen teräspaalu voi menettää stabiiliutensa tasonurjahtamisen lisäksi taivutusvääntönurjahtamalla. Diplomityössä tutkitaan seitsemästä taso-osasta muodostuvaa avointa C-profiilin muotoista teräsporapaalua, jota kutsutaan C-paaluksi. C-paalu sallii porauskärjen noston ja uusiokäytön, jota nykyisin käytössä olevat putkimaiset paaluprofiilit eivät mahdollista. Porauskärjen uusiokäyttö, avoprofiilisen paalun keveys ja asennustehokkuus luovat kilpailuedun tavanomaisiin paalutyyppeihin nähden. Kilpailukykyyn vaikuttaa olennaisesti avoprofiilisen paalun kantavuus, jota ei ole vielä määritetty.

Diplomityön tavoitteena oli määrittää injektoimattoman C-paalun rakennetekninen kantavuus laskelmin ja koekuormituksin. C-paalun rakenteellista kantokestävyyttä tutkittiin Vlasovin avoprofiilisia kimmoisia sauvoja käsittelevällä teorialla. C-paalun stabiiliutta tutkittiin Vlasovin teorian lisäksi FEM-menetelmällä kuorielementtejä käyttäen. Kuormittamalla jatkamattomia ja jatkettuja C-paaluja tutkittiin teoreettisten kantokestävyyksien toteutumista käytännössä sekä C-paalun jatkoksen kestävyyttä ja sen vaikutusta C-paalun rakennetekniseen toimintaan. Työn osatavoitteena oli myös selvittää miten C-paalulle saadaan tuotehyväksyntä.

Työssä määritettiin C-paalun poikkileikkaussuureet ja esitettiin rakenteellisten kantokestävyyksien laskentakaavat eri kuormitustapauksille. Tutkimuksessa selvisi, että Vlasovin teorialla ja FEM-menetelmällä lasketut nurjahduskestävyyden arvot ovat lähes yhtä suuret. C-paalun stabiiliutta tutkittaessa selvisi myös, että C-paalun nurjahduskestävyys on herkkä puristuskuorman epäkeskeisyydelle. Koekuormitusten perusteella määritetyt kantokestävyyden arvot vastasivat hyvin teoreettisia arvoja. Työssä esitetyllä tavalla hitsattu holkkijatkos toteuttaa koetulosten perusteella standardin mukaiset paalun jatkoksen taivutusjäykkyyttä ja vetokestävyyttä koskevat vaatimukset, mutta ei aivan taivutuskestävyyttä koskevaa vaatimusta. Koekuormitusten perusteella jatkoksella ei ole vaikutusta nurjahduskestävyyteen. Sekä teoreettisten menetelmien että koekuormitusten perusteella C-paalun määräävä nurjahdusmuoto on taivutusvääntönurjahdus. C-paalun nurjahduskestävyys voidaan määrittää Vlasovin teorian tai FEM-menetelmän avulla, mutta puristuskuorman epäkeskeisyyden suhteen on otettava mukaan lisävarmuutta. C-paalu kuuluu harmonisoidun tuotestandardin EN 1090-1 piiriin, jolloin sen tuotehyväksyntä on haettava CE-merkinnän avulla. Työssä käsiteltiin standardissa EN 1090-1 esitettyjä C-paalun CE-merkinnän kannalta olennaisia vaatimuksia ja niiden täyttymistä.

Avainsanat teräspaalu, avoin poikkileikkaus, rakenteellinen kantavuus, Vlasov, FEM, CE

Author Joona Tuikka

Title of thesis The Structural Capacity of the Un-injected Open Profile Drilling-Pile

Degree programme Structural Engineering and Building Technology

Major/minor Structural Engineering**Code of professorship** Rak-54

Thesis supervisor Professor Jari Puttonen, Aalto University

Thesis advisor Professor Leena Korkiala-Tanttu, Aalto University

Date 21.3.2014**Number of pages** 126 + 65**Language** Finnish

Abstract

Determining the load capacity of the un-injected open profile steel pile differs from the tubular profile piles. For open cross-sections it is common to have lower torsion and buckling capacity than tubular profiles. Due the openness of the cross-section the open profile pile may lose its stability by flexural-torsional buckling. This study concentrates on an open cross-section steel pile called C-pile. C-pile consists of seven plane sections. Unlike currently used tubular pile profiles the open cross-section allows the drill head lifting making the reuse of the drill head possible. Possibility to reuse the drill head, the lightness of the open cross-section steel pile, and the efficiency of the installation creates a competitive advantage over conventional piles. The competitiveness of piles is affected by the loading capacity of piles which has not yet been determined for C-pile.

The main objective of this study was to determine the structural load capacity of the un-injected C-pile using theoretical calculations and test loadings. The structural load capacity was studied by using Vlasov's theory and Finite Element Method (FEM). In FEM the calculations were made by using shell elements. To find out how accurately the theoretical values of the structural load capacity correspond to reality both the continuous and extended C-piles were test loaded. The aim of test loadings was also to study the load capacity of the joint of the C-pile and how the joint affects to behavior of the extended C-pile. Another objective was to find out what is required for C-pile to get a product approval.

In the study the characteristics of the cross-section of the C-pile were determined and the equations for the structural load capacity for different load cases were presented. The study showed that calculating critical buckling loads using Vlasov's or FEM results nearly equal result. Examination of the stability showed also that the buckling capacity of the C-pile is sensitive to the eccentricity of the compressive load. According to the load tests, the theoretical values of the structural load capacity corresponded well to the experimental. The C-pile joint welded in a way that is presented in study fulfils the standard requirements for the bending stiffness and the tensile capacity but not quite the requirement for the bending capacity. According to buckling tests the joint does not have an effect to the buckling capacity of the C-pile. Both the theoretical and the experimental studies showed that the critical buckling shape of C-pile is the flexural-torsional buckling. The buckling load of the C-pile can be calculated using Vlasov's theory or FEM, but in both methods an extra safety factor for the eccentricity of compressive load should be used. Because the C-pile is under harmonized European standard EN 1090-1, the product approval is done by CE marking. In terms of C-pile the essential requirements presented in standard EN 1090-1 and fulfilment of these requirements are discussed.

Keywords steel pile, open cross-section, structural loading capacity, Vlasov, FEM, CE

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston insinöörityöiden korkeakoulun georakentamisen tutkimusryhmässä. Työ on osa FIN-C2M -hanketta, jonka tavoitteena on kehittää uusia mikropaalupohjaisia tuotteita ja innovaatioita. FIN-C2M -hankkeen keskiössä on Turun Ammattikorkeakoulussa kehitetty uuden tyyppinen, patentoitu avoimen C-profiilin muotoinen teräsporapaalu, jota on ollut myöhemmin kehittämässä useat yritykset. Hankkeen osapuolina ovat Turun ammattikorkeakoulu, Aalto-yliopisto, Suomen Teräspaalaus Oy sekä Emeca Oy. Diplomityö on Tekesin, Emeca Oy:n, Suomen Teräspaalaus Oy:n ja Aalto-yliopiston rahoittama. Haluan kiittää hankkeen osapuolia ja työn rahoittajia mielenkiintoisesta aiheesta, joka oli samalla sekä teoreettinen että käytännönläheinen.

Työtä valvoi professori Jari Puttonen, jota kiitän työn tarkastamisesta ja kaikista kommenteista. Kiitokseni haluan myös esittää työtä ohjanneelle ja kommentoineelle professori Leena Korkiala-Tantulle kaikesta avusta työn aikana. Aalto-yliopiston Rakennetekniikan koehallin henkilökuntaa ja etenkin yli-insinööri Veli-Antti Hakalaa, Pertti Alhoa sekä Matti Ristimäkeä haluan kiittää osallistumisesta työn koekuormituksiin ja niihin liittyvistä hyvistä neuvoista. Kiitokset hyvästä ja avuliaasta työilmapiiristä georakentamisen tutkimusryhmän henkilökunnalle sekä Sami Lönnrothille ja muille diplomityöntekijöille. Suuret kiitokset kuuluvat myös TkT Djebbar Baroudille, emeritusprofessori Jukka Aallolle sekä professori Juha Paavolalle rakenteiden mekaniikan opettamisesta Aalto-yliopiston Rakennetekniikan laitoksella.

Lopuksi haluan kiittää läheisiäni, opiskelukavereitani sekä erityisesti kihlattuani Siniä kaikesta tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Espoo 21.3.2014

Joona Tuikka

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo	5
Merkinnät	7
Termit, määritelmät ja lyhenteet	10
1 Johdanto	11
2 C-paalu	13
2.1 Yleistä	13
2.2 Materiaaliominaisuudet	17
2.3 Korroosion kesto	17
2.4 Asennus- ja jatkostekniikka	19
3 Teräspaalun tuotteistaminen	21
3.1 Rakennustuotteiden tuotehyväksyntä	21
3.2 C-paalun CE-merkintä standardin SFS-EN 1090-1 mukaan	25
4 Rakenteellisen kantokestävyyden määrittäminen	31
4.1 Poikkileikkaussuureet	31
4.2 Puristettu poikkileikkaus	38
4.2.1 Murtomekanismit	38
4.2.2 Puristuskestävyyden määrittäminen	41
4.3 Vedetty poikkileikkaus	52
4.4 Taivutettu poikkileikkaus	54
4.5 Kuormien yhteisvaikutukset	56
4.6 Leikkauskestävyys	59
4.7 C-paalun ja putkiprofiilin puristus- ja taivutuskestävyyksien vertailu	62
5 Rakennetekniset koekuormitukset	64
5.1 Koekuormituksissa käytetyt C-paalut	64
5.2 Standardin EN ISO 6892-1 mukainen vetokoe	67
5.2.1 Koejärjestelyt	67
5.2.2 Mittaustulokset ja niiden arviointi	69
5.3 Lyhyen C-paalun puristuskoe	73
5.3.1 Koejärjestelyt	73
5.3.2 Mittaustulokset ja niiden arviointi	74
5.4 Taivutuskoe	80
5.4.1 Koejärjestelyt	80
5.4.2 Mittaustulokset ja niiden arviointi	83
5.5 Nurjahduskoe	90
5.5.1 Koejärjestelyt	90
5.5.2 Mittaustulokset ja niiden arviointi	94
5.6 Jatkoksen puristuskoe	98
5.6.1 Koejärjestelyt	98
5.6.2 Mittaustulokset ja niiden arviointi	100
5.7 Jatkoksen vetokoe	103

5.7.1	Koejärjestelyt	103
5.7.2	Mittaustulokset	105
6	Teoreettisen kantokestävyyden ja koetulosten vertailu ja analysointi	107
6.1	Yleistä	107
6.1.1	Koekappalekohtaisten poikkileikkaussuureiden laskeminen	107
6.1.2	Tulosten luotettavuuteen vaikuttavat epävarmuustekijät	109
6.2	Taivutuskestävyys	110
6.3	Puristuskestävyys	111
6.3.1	Herkkyysanalyysi puristuskuorman epäkeskeisyyden suhteen	111
6.3.2	Teoreettisten arvojen ja koetulosten vertailu ja analysointi	113
7	Johtopäätökset	120
	Lähdeluettelo	123
	Liiteluettelo	126
	Liitteet	

Merkinnät

A	[m ²]	nettopinta-ala
	[m]	(tuetun taso-osan välinen leveys taulukossa 3.4)
-		(napapiste kohdassa 4.1)
A _p	[m ²]	paalun pinta-ala (mitattu arvo)
A _{p,0}	[m ²]	paalun yksinkertaistetun poikkileikkauksen pinta-ala
A _{p,ka}	[m ²]	paalun poikkileikkauksen keskimääräinen pinta-ala (mitattu arvo)
A _{p,k.0}	[m ²]	paalun pinta-ala kärjessä
A _{p,r}	[m ²]	paalun pinta-ala alapaalun reikien kohdalla (mitattu arvo)
A _{p,r.0}	[m ²]	paalun pinta-ala alapaalun reikien kohdalla
A _{p,w.0}	[m ²]	paalun pinta-ala katkohitsien välissä
A _{p,0}	[m ²]	paalun pinta-ala katkohitsien välissä
B	[Nm ²]	bimomentti
	[m]	(taivutuksen ja vapaan reunan välinen leveys taulukossa 3.4)
\bar{B}	[Nm ²]	ulkoinen bimomentti
D	[m]	C-paalun ulkohalkaisijan mitta
	[m]	(kuperuus tai koveruus taulukossa 3.4)
E	[MPa]	kimmomoduuli
E _t	[MPa]	jännityksestä riippuva epälineaarinen tangenttimoduuli
EI	[Nm ²]	taivutusjäykkyys
EI _{jatkos}	[Nm ²]	jatkoksen taivutusjäykkyys
F _w	[N/m]	hitsin kestävyys yksikköpituutta kohti
G	[MPa]	liukukerroin
H	[m]	C-paalun hahlon leveys
I _y	[m ⁴]	jäyhyysmomentti y-y-akselin suhteen
I _{yω}	[m ⁵]	sektoriaalinen tulomomentti y-y-akselin suhteen
I _z	[m ⁴]	jäyhyysmomentti z-z-akselin suhteen
I _{zω}	[m ⁵]	sektoriaalinen tulomomentti z-z-akselin suhteen
I _{yz}	[m ⁴]	tulomomentti
I _t	[m ⁴]	vääntöjäyhyysmomentti
I _{1,2}	[m ⁴]	pääjäyhyysmomentit
I _{ωV}	[m ⁶]	sektoriaalinen jäyhyysmomentti
L	[m]	pituus
L _c	[m]	koepituus metallien vetokokeessa
L _n	[m]	nurjahduspituus
L _t	[m]	koesauvan kokonaispituus metallien vetokokeessa
L _v	[m]	y-suuntaista tasonurjahtamista vastaava nurjahduspituus
L _w	[m]	z-suuntaista tasonurjahtamista vastaava nurjahduspituus
L ₀	[m]	alkumittapituus metallien vetokokeessa
L _φ	[m]	vääntönurjahtamista vastaava nurjahduspituus
M	[Nm]	poikkileikkaukseen kohdistuva taivutusmomentti
M _p	[Nm]	paalun jatkamattoman osan taivutuskestävyyden ominaisarvo
M _{p,jatkos}	[Nm]	jatkoksen taivutuskestävyyden ominaisarvo
M _t	[Nm]	vääntömomentti

M_y	[Nm]	y-akselin ympäri vaikuttava taivutusmomentti
M_z	[Nm]	z-akselin ympäri vaikuttava taivutusmomentti
M_ω	[Nm]	sektoriaalinen vääntömomentti
N	[N]	poikkileikkaukseen kohdistuva normaalivoima
$N_{c,k}$	[N]	paalun teräsosan puristuskestävyyden ominaisarvo
$N_{c,p}$	[N]	paalun puristuskestävyyden ominaisarvo
$N_{c,y}$	[N]	kimmoteorian mukainen myötökuorman arvo
$N_{c,y,p,k}$	[N]	paalun myötökuorman ominaisarvo kärjessä
$N_{c,y,p,r}$	[N]	paalun myötökuorman ominaisarvo reikien kohdalla
$N_{c,y,p,w}$	[N]	paalun myötökuorman ominaisarvo katkohitsin kohdalla
$N_{c,y,p,0}$	[N]	paalun myötökuorman ominaisarvo katkohitsien välissä
$N_{j,w}$	[N]	holkkijatkoksen hitsien kautta välittyvän kuorman ominaisarvo
N_t	[N]	keskeisesti vedetyn poikkileikkauksen kestävyys ominaisarvo
$N_{t,p}$	[N]	paalun vetokestävyys ominaisarvo
$N_{t,p,k}$	[N]	paalun vetokestävyys ominaisarvo kärjessä
$N_{t,p,r}$	[N]	paalun vetokestävyys ominaisarvo reikien kohdalla
$N_{t,p,w}$	[N]	paalun vetokestävyys ominaisarvo katkohitsin kohdalla
$N_{t,p,0}$	[N]	paalun vetokestävyys ominaisarvo katkohitsien välissä
O'	-	nollapiste
P	[N]	poikkileikkaukseen kohdistuva pistekuorma
P_{cr}	[N]	kriittinen nurjahduskuorma
P_v	[N]	tasonurjahduskuorma y-suunnassa
P_w	[N]	tasonurjahduskuorma z-suunnassa
P_ϕ	[N]	vääntönurjahduskuorma
Q	[N]	poikkileikkaukseen kohdistuva leikkausvoima
Q_y	[N]	y-akselin suuntainen leikkausvoimaresultantti
Q_z	[N]	z-akselin suuntainen leikkausvoimaresultantti
R	[m]	sisäpuolinen taivutussäde
R_{eH}	[MPa]	tuotestandardien mukainen myötöraja
R_m	[MPa]	tuotestandardien mukainen vetomurtolujuus
S_y	[m ³]	staattinen momentti y-y-akselin suhteen
S_z	[m ³]	staattinen momentti z-z-akselin suhteen
S_ω	[m ⁴]	sektoriaalinen staattinen momentti
S_0	[m]	koesauvan suoran osan poikkipinta-ala ennen vetokoetta
W_t	[m ³]	vääntövastus
a	[m]	hitsin efektiivinen mitta
	[m]	(lattakoesauvan suoran osan paksuus kohdassa 5.2)
b	[m]	poikkileikkauksen leveys
	[m]	(lattakoesauvan suoran osan leveys kohdassa 5.2)
b_p	[m]	taso-osan leveys
e_p	[m]	kuorman epäkeskeisyys
e_y	[m]	kuorman epäkeskeisyys y-suunnassa
e_z	[m]	kuorman epäkeskeisyys z-suunnassa
e_w	[m]	katkohitsien välinen etäisyys
f_u	[MPa]	teräksen vetomurtolujuus

f_y	[MPa]	teräksen myötöraja
h	[m]	poikkileikkauksen korkeus
h_{Aj}	[m]	etäisyys pisteeseen j asetetun tangentin ja napapisteen A välillä
l_w	[m]	katkohitsin pituus
$l_{w,j}$	[m]	holkkijatkoksen ja C-paalun särmällä sijaitsevan hitsin pituus
m	[kg]	massa
q	[N/m]	sauvan pintakeskiöakselilla taipuman suuntaan vaikuttava viiva-kuorma
s	-	poikkileikkauksen keskiviivalla sijaitseva piste
s_p	[m]	paalun yksinkertaistetun poikkileikkauksen keskilinjan piiri
s_i	[m]	poikkileikkauksen taso-osan pituus
$s_{p.0}$	[m]	paalun piiri laskettuna keskiviivaa pitkin katkohitsin välissä
$s_{p.k.0}$	[m]	paalun piiri laskettuna keskiviivaa pitkin paalun kärjessä
$s_{p.r.0}$	[m]	paalun piiri laskettuna keskiviivaa pitkin alapaalun reikien kohdalla
$s_{p.w.0}$	[m]	paalun piiri laskettuna keskiviivaa pitkin katkohitsin kohdalla
t	[m]	seinämävahvuus
v	[m]	siirtymä y-suunnassa
w	[m]	siirtymä z-suunnassa
$x-x$	-	sauvan pituussuuntainen akseli
y_v	[m]	vääntökeskiön y-koordinaatti
$y-y$	-	poikkileikkauksen akseli
z_v	[m]	vääntökeskiön z-koordinaatti
$z-z$	-	poikkileikkauksen akseli
Δ	-	geometristen toleranssien sallittu mittapoikkeama
Δy	[m]	kappaleen suoruuspoikkeama y-suunnassa
Δz	[m]	kappaleen suoruuspoikkeama z-suunnassa
α	[1/°C]	lineaarinen lämpölaajenemiskerroin taulukossa 2.3
β_w	-	pienahitsin korrelaatiokerroin
δ	[m]	mittauspisteiden välinen taipuma
θ	[°]	viereisten taso-osien välinen kulma
ν	-	Poissonin luku
ρ	[kg/m ³]	tiheys
σ_{cr}	[MPa]	nurjahduskuormaa P_{cr} vastaava nurjahdusjännitys
σ_x	[MPa]	x-suunnassa vaikuttava normaalijännitys
τ_{xs}	[MPa]	poikkileikkauksen keskiviivan suuntainen leikkausjännitys jakauma
$\bar{\tau}_{xs}$	[MPa]	leikkausvuota vastaava keskimääräinen leikkausjännitys
τ_{xs}^t	[MPa]	Saint Venant'in väännön leikkausjännitys
ω	[m ²]	sektoriaalinen koordinaatti
ω_A	[m ²]	napapisteen A suhteen laskettu sektoriaalinen koordinaatti
ω'_v	[m ²]	vääntökeskiön V suhteen laskettu sektoriaalinen koordinaatti, jonka nollapiste on O'
ω_v	[m ²]	normeerattu vääntökeskiön V suhteen laskettu sektoriaalinen koordinaatti

Termit, määritelmät ja lyhenteet

AVCP	Suoritustason pysyvyyden arviointi- ja varmentaminen
CE-merkintä	Yksi tuotehyväksyntämenettelyistä ja valmistajan ilmoitus siitä, että tuote täyttää sitä koskevat Euroopan unionin vaatimukset. Kirjainyhdistelmä CE tulee ranskankielisestä nimestä <i>Conformité Européenne</i> .
DoP	Rakennustuotteiden CE-merkinnässä edellytettävä suoritus-tasoilmoitus
ETA	Eurooppalainen tekninen arviointi, joka johtaa CE-merkintään
FEM	Elementtimenetelmä, joka on lyhenne englanninkielen sanoista <i>Finite Element Method</i>
OSD-paalu	C-paalulle myös käytettävä nimitys, joka tulee englanninkie-len sanoista <i>Open Section Drilling -Pile</i>
RIL	Rakennusinsinööriliitto
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
hEN	EU:n komission toimeksiannosta eurooppalaisen standardi-soimisjärjestön laatima CE-merkintään johtava harmonisoitu (yhdenmukaistettu) tuotestandardi

1 Johdanto

Tutkimuksen tausta

Injektoimattoman poikkileikkaukseltaan avoimen teräsporapaalun kantavuuden määrittäminen poikkeaa tavanomaisista putkimaisista paaluprofiileista. Avonaisille poikkileikkauksille ominaista on putkiprofiileja heikompi vääntö- ja nurjahduskestävyys. Poikkileikkauksen avonaisuudesta johtuen avoprofiilinen teräspaalu voi menettää stabiiliutensa tasonurjahtamisen lisäksi taivutusvääntönurjahtamalla.

Diplomityössä tutkitaan uuden tyyppistä seitsemästä taso-osasta muodostuvaa avointa C-profiilin muotoista teräsporapaalua. Avoprofiilista teräsporapaalua kutsutaan sekä C-paaluksi että OSD-paaluksi (Open Section Drilling -Pile), mutta diplomityössä käytetään nimitystä C-paalu. C-paalua voidaan käyttää jatkamattomana tai se voidaan jatkaa haluttuun pituuteen holkkijatkoksen avulla. C-paalu soveltuu esimerkiksi mataliin perustuksiin korvaamaan anturaperustusta sekä korjaus- että uudisrakentamisessa. C-paalua voidaan käyttää injektoituna tai injektoimattomana ja sitä on suunniteltu käytettäväksi kevyehköiden rakenteiden kuten omakotitalojen, katosten ja meluvallien paalutuksiin. C-paalun avoin poikkileikkaus sallii porauskärjen noston ja uusiokäytön, jota nykyisin käytössä olevat putkimaiset profiilit eivät mahdollista. Porauskärjen uusiokäyttö, avoprofiilisen teräsporapaalun keveys ja asennustehokkuus luovat taloudellisen kilpailuedun tavanomaisiin paalutyyppeihin nähden. Kilpailukykyyn vaikuttaa olennaisesti C-paalun kantavuus, jota ei ole aiemmin määritetty.

Paalun kantavuus määräytyy joko rakenteellisesta tai geoteknisestä kantavuudesta. Paalun rakenteellinen kantavuus määritetään poikkileikkauksen rakenteellisen kantokestävyyden mukaan, kun taas geotekninen kantavuus määräytyy lähinnä paalua ympäröivän maan sekä paalun alla olevan pohjan kokoonpuristuvuudesta ja lujuudesta. Paalun rakennetekninen kantokestävyys on yleensä geoteknistä kantokestävyyttä suurempi, mutta esimerkiksi tilanteissa, joissa paaluun aiheutuu taivutusta tai paalun kärkiosa tukeutuu kallioon, on rakenteellinen kantavuus useimmiten määrävänä. (Rantamäki & Tamminen 1984, s. 49.)

Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö

Diplomityön tavoitteet voidaan jakaa päätavoitteeseen ja kahteen osatavoitteeseen. Pää-tavoitteena on määrittää laskelmin ja koekuormituksin C-paalun rakennetekninen kantokestävyys paalun mitoitusmenetelmien kehittämiseksi. Osatavoitteena on tutkia C-paalun jatkostekniikkaa, jatkoksen kestävyyttä ja sen vaikutusta C-paalun rakennetekniseen toimintaan. Suomen maankäyttö- ja rakennuslain mukaan rakennustuotteiden kelpoisuus rakentamisessa käytettäväksi tulee osoittaa tuotehyväksynnän avulla. Yhtenä kelpoisuuskriteerinä on rakenteiden lujuutta ja vakautta koskevat vaatimukset. Diplomityön toisena osatavoitteena on selvittää miten C-paalulle saadaan tuotehyväksyntä ja esittää tuotehyväksyntään liittyvät rakenteellisen kantokestävyyden kannalta olennaiset vaatimukset.

Työn alussa esitellään C-paalun poikkileikkaus ja materiaalitiedot sekä kerrotaan paalun valmistuksesta, asennustekniikasta ja toimintaperiaatteesta. C-paalun esittelyn jälkeen työssä käydään läpi rakennustuotteiden tuotehyväksyntämenettelyt, CE-merkinnän vaiheet sekä C-paalun CE-merkinnässä edellytetyt rakenteelliseen kantokestävyyteen liittyvät olennaiset vaatimukset ja niiden arviointimenetelmät. Tämän jälkeen määritetään C-paalun poikkileikkaussuureet sekä olennaisimmat rakenteellisen kantokestävyyden ominaisarvot Vlasovin ohutseinämäisiä kimmoisia sauvoja käsittelevällä teorialla. C-paalun stabiiliutta tarkastellaan lisäksi FEM-laskelmien avulla. Teoreettisten kantokestävyyksien ominaisarvojen määrittämisen jälkeen verrataan C-paalua kooltaan vastaavaan putkiprofiilipaaluun puristus- ja taivutuskestävyyksien osalta, jotka ovat paalujen rakenteellisen kantavuuden kannalta usein merkittävimmät tekijät. C-paalun rakenteellista kantokestävyyttä tutkitaan Aalto-yliopiston rakennetekniikan koehallissa suoritettavilla koekuormituksilla. Rakenneteknisissä koekuormituksissa tutkitaan jatkamattoman sekä jatkettun C-paalun taivutus-, puristus- ja nurjahduskestävyyttä sekä jatkoksen vetokestävyyttä. Koekuormituksilla on tarkoitus selvittää jatkoksen kestävyyttä ja vaikutusta C-paalun toimintaan. Lisäksi C-paalussa käytettävän teräksen todellisten myötö- ja murtolujuuden sekä kimmokertoimen arvot määritetään metallien vetokokeilla. Ennen työn lopussa esitettäviä johtopäätöksiä vertaillaan teoreettisia kantokestävyyden arvoja kokeiden perusteella määritettyihin arvoihin, arvioidaan tulosten luotettavuutta sekä tehdään herkkyyksianalyysi C-paalun nurjahduskestävyydelle puristuskuorman epäkeskeisyyden suhteen.

Tutkimuksen rajaukset

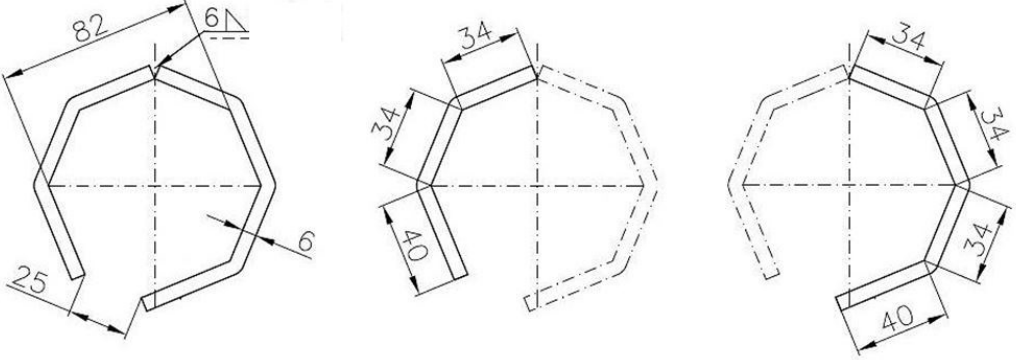
C-paalua voidaan käyttää sekä injektoituna että injektoimattomana. Diplomityössä tutkitaan ainoastaan injektoimattoman C-paalun rakenteellista kantokestävyyttä. Rakenteellista kantokestävyyttä tutkitaan ilman ympäröivän maan vaikutusta. C-paalua voidaan valmistaa eri seinämävahvuuksilla, mutta työssä tutkittavan C-paalun teräsoosan seinämävahvuus on 6 mm. Jatkoksen vaikutusta C-paalun nurjahdukseen on vaikea määrittää käsinlaskennalla. Tästä syystä jatkoksen vaikutusta nurjahdukseen tutkitaan kokeellisesti. Jatkoksen taivutuskestävyyden ja -jäykkyyden määrittäminen suoritetaan eurokoodin mukaisen koekuormitusten avulla. Muille rakenteellisen kantokestävyyden määrittämisille ei ole olemassa eurokoodien mukaisia koekuormituksia.

2 C-paalu

2.1 Yleistä

C-paalu on Turun ammattikorkeakoulun kehittämä uuden tyyppinen, patentoitu, yhdeltä sivulta avoin teräsporapaalu, joka sallii porauskärjen noston ja uusiokäytön. C-paaluja voidaan valmistaa ja käyttää eri halkaisijoilla ja seinämäpaksuuksilla, mutta tässä työssä tutkitaan taulukossa 2.1 esitettyä tyypillisintä poikkileikkausta, jonka sisähalkaisija on 82 mm. Paalu on mahdollista jatkaa hitsatulla holkkiliitoksella haluttuun kokonaispituuteen. Yksittäisten paalujen pituudet vaihtelevat välillä 1–6 metriä.

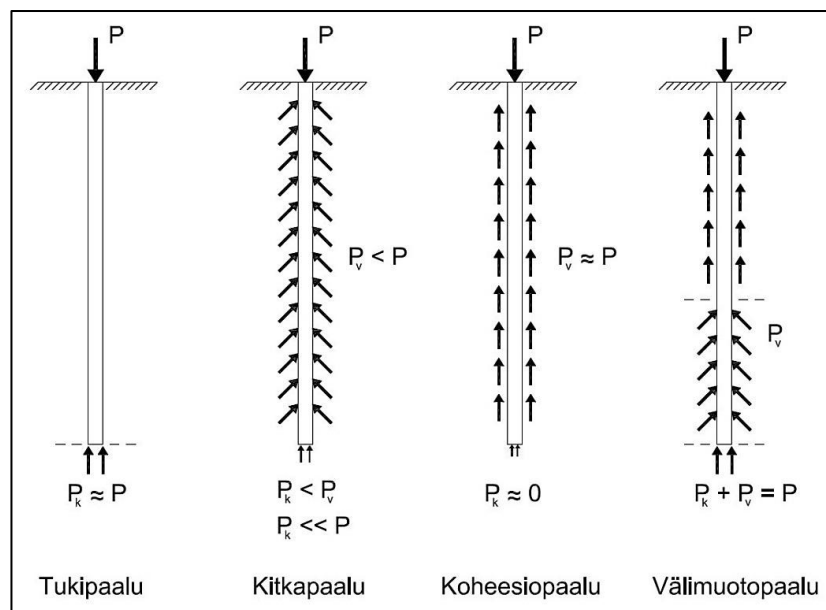
Taulukko 2.1. C-paalan laskennallisia mittoja (Emeca Oy).

	
Nimike	Mitta
Sisähalkaisija	82,0 mm
Seinämäpaksuus t	6,0 mm
Seinämän sisämitat	34,0 mm 40,0 mm
Paalun piiri (laskettu keskiviivaa pitkin) <ul style="list-style-type: none"> • katkohitsin kohdalla $s_{p.w.0}$ • katkohitsin välissä $s_{p.0}$ • alapaalun reiän kohdalla $s_{p.r.0}$ • kärjessä $s_{p.k.0}$ 	264,0 mm 261,6 mm 231,6 mm 244,0 mm
Paalun pinta-ala <ul style="list-style-type: none"> • katkohitsin kohdalla $A_{p.w.0}$ • katkohitsin välissä $A_{p.0}$ • alapaalun reiän kohdalla $A_{p.r.0}$ • kärjessä $A_{p.k.0}$ 	1584,0 mm ² 1569,7 mm ² 1389,7 mm ² 1464,0 mm ²

C-paalu voidaan asentaa maahan lyömällä tai täryttämällä, mutta pääsääntöisesti asennus tehdään poraamalla, jolloin asennus onnistuu myös kallion sisään. C-paalu on maata syrjäyttämätön, kun sen asennus tapahtuu poraamalla. Paalu voidaan injektoida sementillä sisä- ja ulkopuolelta porauksen yhteydessä. Injektoinnilla voidaan kasvattaa paalun rakenteellista sekä geoteknistä kantavuutta.

C-paalun toimintaperiaate

C-paalu välittää kuormia kuvassa 2.1 esitetyillä tavoilla riippuen ympäröivän maan ominaisuuksista. Paalu toimii tukipaaluna, kun sen kärki tukeutuu kallioon tai tiivisra-kenteiseen maaperään. Tukipaalussa kuormat siirtyvät kallioon tai kiinteään pohjaan lähinnä kärjen kautta. Kitkapaalussa paalukuorma välittyy pääosin paalun vaippapinnan ja kitkamaan välisen hankauksen avulla ympäröivään maahan. Koheesiopaalussa kuor-mat siirtyvät koheesiomaahan lähes kokonaan paalun vaippapinnan ja ympäröivän maan välisellä koheesiolla. Todellisuudessa paalut toimivat usein yhdistelmänä esitetyistä toimintatavoista, jolloin paalua kutsutaan välimuotopaaluiksi. Välimuotopaalussa kuormat siirtyvät sekä kärkivastuksen että kitkan tai koheesion avulla. (Rantamäki & Tammirinne 1987, s. 43–44; Winterkorn & Fang 1975, s. 557–558.)

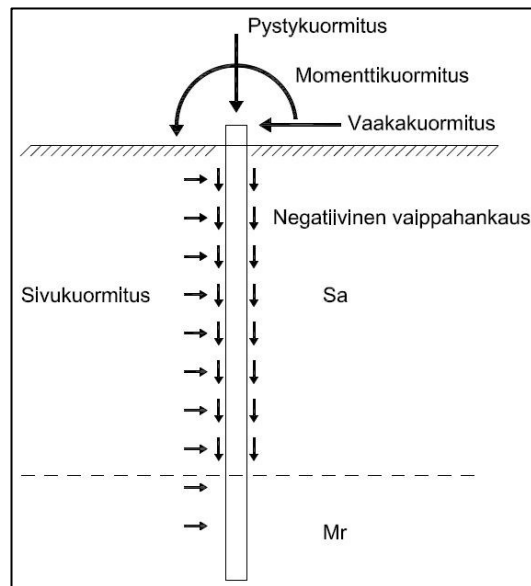


Kuva 2.1. Paalujen toimintatavat ympäröivän maan perusteella (Rantamäki & Tammi-rinne 1987, muokattu kuvasta 1).

C-paalu luokitellaan ns. pienpaaluihin, joista käytetään myös nimitystä mikropaalut (Fleming ym. 1992, s. 84). Teräsprofiiliset pienpaalut ovat halkaisijaltaan 30–300 mm ja ne suunnitellaan taloudellisuuden vuoksi yleensä tukipaaluiksi, jolloin niiden raken-teellinen kestävyys voidaan parhaiten hyödyntää (Jääskeläinen 2009, s. 106).

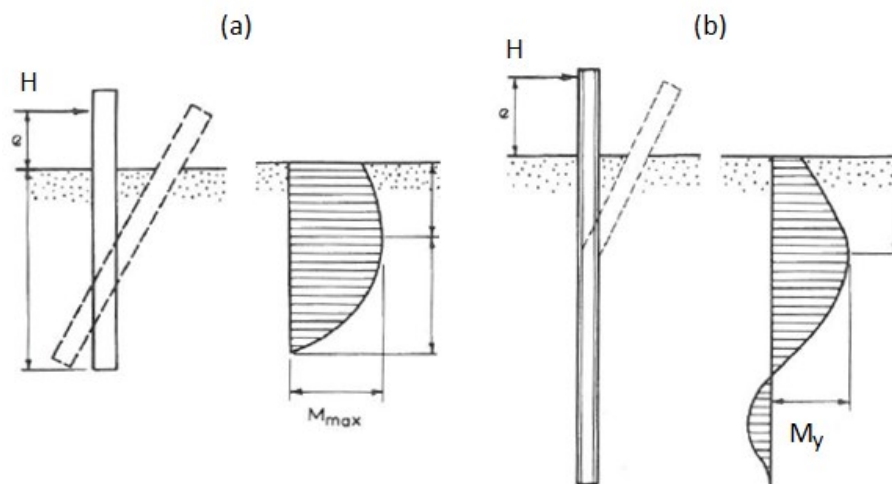
Paalujen rakenteellista kantavuutta määritettäessä on otettava huomioon paaluun sen koko käyttöiän aikana kohdistuvat ulkoiset kuormat sekä kuormien yhteisvaikutukset. Paaluilla siirrettävät tyypillisimmät ulkoiset kuormat on esitetty kuvassa 2.2. Paaluihin kohdistuu käytön aikana niiden kannattamista rakenteista pääsääntöisesti pystykuormia, mutta niihin voi kohdistua myös vaaka- ja momenttikuormituksia. Paaluihin voi kohdis-tua sivukuormitusta maan liikkeessä, mikä voi aiheutua esimerkiksi huonosta alueelli-sestä tai paalutusalueen vakavuudesta tai paalutuksen aiheuttamista maan siirtymistä. Sivukuormitus aiheuttaa paaluille taivutusrasituksen. Paaluihin kohdistuvia taivutusrasi-tuksia voi aiheutua myös paalun pituussuuntaisen kuorman epäkeskeisyydestä ja paalun alkukaarevuudesta tai vinoudesta. Paalujen rakenteellista kantokestävyyttä määrittäessä

on otettava huomioon paalulle negatiivisesta vaippahankauksesta aiheutuva lisäkuorma, joka syntyy, kun maa paalun ympärillä painuu enemmän kuin paalu. (RIL 230-2007, s. 82-84 ja s. 109.)



Kuva 2.2. Paaluun vaikuttavat ulkoiset kuormitukset (RIL 230-2007, kuva 6.4, s. 83).

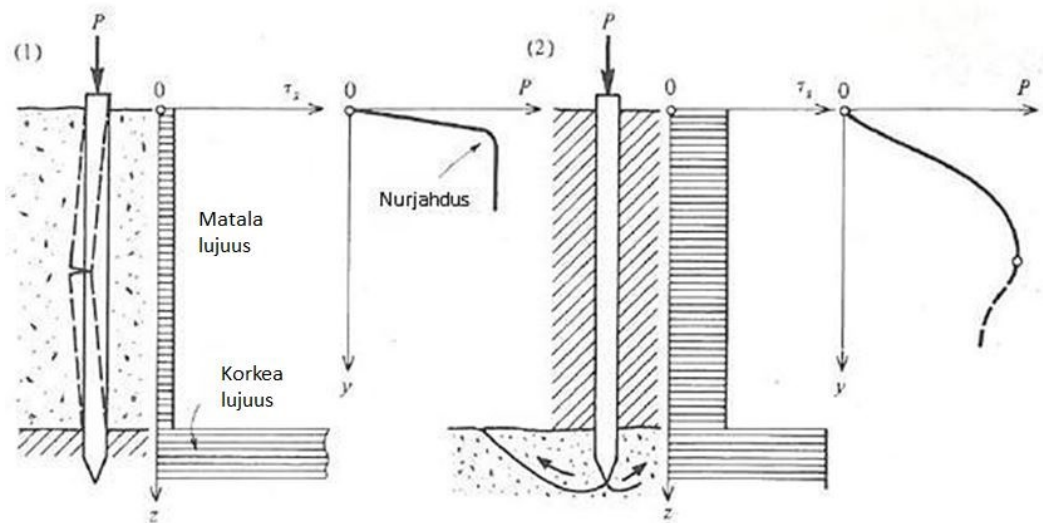
Paalun murtomekanismit riippuvat ympäröivän maan ominaisuuksista ja paalun pituudesta. Kuvassa 2.3 on esitetty kaksi erilaista vaakakuormitetun paalun tilannetta, joissa molemmissa paalua ympäröivä maa murtuu. Lyhyen paalun tilanteessa (a) geotekninen kantokestävyys on määrävänä. Tilanteessa (b), jossa maan ominaisuudet ovat samat kuin tilanteessa (a), pidemmän paalun taivutuskestävyys ylittyy ennen ympäröivän maan murtumista. (Poulos & Davis 1980, s. 149–150.)



Kuva 2.3. Lyhyen (a) ja pitkän paalun (b) käyttäytyminen vaakakuormituksessa (Poulos & Davis 1980, s. 150, muokattu kuvasta 7.11)

Kuvassa 2.4 on esitetty paalua ympäröivän maan lujuuden vaikutus lujaan maaperään tukeutuvan paalun murtomekanismeihin. Kuvan tilanteessa (1) paalu nurjahtaa riittävän sivutuennan puuttuessa. Tilanteessa (2), paalukärjen alla oleva maa leikkautuu ennen

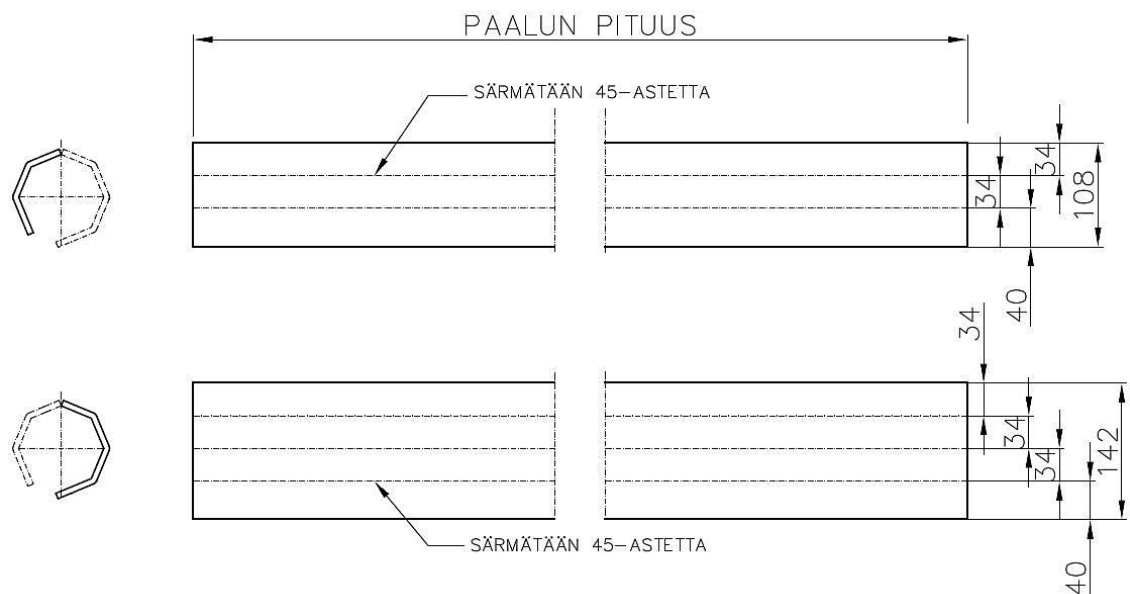
paalun puristuskestävyyden ylittymistä tai stabiiliuden menettämistä. Paalun kärki- tai varsiosan myötöraja voi myös ylittyä tilanteissa (1) tai (2) ennen paalun nurjahtamista tai alemman maakerroksen leikkautumista. (Winterkorn & Fang 1975, s. 560.)



Kuva 2.4. Ympäröivän maan lujuuden vaikutus paalun murtomekanismeihin (Winterkorn & Fang 1975, s. 560, muokattu kuvasta 19.8).

C-paalun valmistus

C-paalu valmistetaan kuvan 2.5 mukaisesti kahdesta osasta särmäämällä teräslevyt ja liittämällä ne hitsaamalla. Jotta poikkileikkaus ei vääristyisi hitsauksen tuottamasta lämmöstä, on päädytty käyttämään katkohitsiä. Katkohitsin pituutta ja hitsien välistä etäisyyttä ei ole vielä vakioitu. Diplomityössä tutkittavan C-paalun pituussuuntaisen katkohitsin efektiivinen mitta (a-mitta) on 6 mm.



Kuva 2.5. Tutkittavan C-paalun valmistuskuva (Emeca Oy).

2.2 Materiaaliominaisuudet

C-paalun materiaalina käytetään standardin EN 10149-2 mukaista lujaa kylmämuovattavaa terästä S355MC. Nimikkeessä tunnus S tarkoittaa rakenneterästä, 355 myötölujuuden vähimmäisvaatimusta [N/mm^2], M toimitustilan tunnusta ja C teräksen soveltuvuutta kylmämuovaukseen (SFS-EN 10149-1, s. 8). Toimitustilatunnus M tarkoittaa, että teräs on termomekaanisesti valssattu. Taulukossa 2.2 on esitetty C-paalun rakenteellisen kantokyvyn kannalta merkittävät materiaalin mekaanisten ominaisuuksien vaatimukset perustuen standardin EN 10149 osiin 1 ja 2 sekä standardiin EN 10025-4.

Taulukko 2.2. Rakenneteräksen S355MC mekaanisten ominaisuuksien vaatimukset.

Mekaaninen ominaisuus	Lämpötila	Ominaisarvo	Nimellispaksuus t
Ylempi myötöraja R_{eH}	+20 °C	$\geq 355 \text{ MPa}$	$1,5 \text{ mm} \leq t \leq 20 \text{ mm}$
Murtolujuus R_m	+20 °C	430...550 MPa	$1,5 \text{ mm} \leq t \leq 20 \text{ mm}$
Iskuenergia	-20 °C	$\geq 40 \text{ J}$	$t \geq 6 \text{ mm}$

Rakenneteräksen S355MC toteuttaessa standardien EN 10025-4 ja EN 10149-2 mukaiset vaatimukset, voidaan C-paalun rakenteellisen kantokestävyyden määrittämisessä käyttää taulukon 2.3 mukaisia rakenneteräksen myötörajan f_y ja vetomurtolujuuden f_u nimellisarvoja sekä materiaalivakioiden mitoitusarvoja (SFS-EN 1993-1-1, s. 25 – 28).

Taulukko 2.3. Rakenneteräksen S355MC ominaisarvoja (SFS-EN 1993-1-1, s. 25-28 ja s. 55).

Mekaaninen ominaisuus	Ominaisarvo
Myötöraja f_y	355 MPa
Vetomurtolujuus f_u	470 MPa
Leikkauslujuus	$\frac{f_y}{\sqrt{3}} \approx 204,96 \text{ MPa}$
Kimmokerroin E	210 GPa
Poissonin luku ν	0,3
Liukukerroin G	$\frac{E}{2(1+\nu)} \approx 80,77 \text{ GPa}$
Lämpölaajenemiskerroin α	$12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (kun $T \leq 100 ^\circ\text{C}$)
Tiheys ρ	7850 kg/m^3

2.3 Korroosion kesto

Teräspaalujen käyttö- ja murtorajatilojen kantokestävyysskkelmissä tulee ottaa huomioon teräksen paksuuden tasainen oheneminen joka puolella poikkileikkauksen piirin ympärillä ellei toisin määritetä (SFS-EN 1993-5, kohta 4.2). Teräksen paksuuden oheneminen ajan kuluessa otetaan huomioon suunnittelussa korroosiovarana. Korroosiovara on riippuvainen rakenteen käyttöiästä ja ympäristöolosuhteiden korroosioominaisuuksista. Teräspaaluilla, jotka suunnitellaan meriveden läheisyyteen tai häiriintyneeseen maaperään, on korroosio kaikkein merkittävinä (Fleming ym. 1992, s. 85).

Teräspaaluja koskevan standardin SFS-EN 1993-5 kohdassa 4.4 on esitetty korroosion aiheuttaman seinämäpaksuuden vähennysarvoja olosuhteiden ja käyttöiän suhteessa. Standardin mukaan ilmatilakorroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemisen arvoksi voidaan valita 0,01 mm vuodessa normaalissa ilmastossa ja 0,02 mm vuodessa paikoissa, joissa meriolosuhteet voivat vaikuttaa rakenteen toimivuuteen.

Tavanomaisissa olosuhteissa maan sisällä korroosiovaraksi valitaan vähintään 1,2 mm sadassa vuodessa paalun käyttöpinnoilla. Korroosion aiheuttama teräksen oheneminen voidaan jättää huomioimatta paalun sisäpuolella, jos paalu injektoidaan. (RIL 254-1-2011, kohta 4.7.6.1). Ympäristöolosuhteiden ja ajan suhteen riippuvainen teräksen paksuuden oheneminen on esitetty taulukoissa 2.4 ja 2.5.

Taulukko 2.4. Maahan asennettujen suojaamattomien teräspaalujen korroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemisen suositeltavat arvot [mm] (SFS-EN 1993-5, taulukko 4-1).

Suunniteltu käyttöikä	5 v.	25 v.	50 v.	75 v.	100 v.
Häiriintymättömät luonnonmaat (hiekkä, siltti, savi, liuske...)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Pilaantuneet luonnonmaat ja teollisuusalueiden maa-alueet	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressiiviset luonnon maat (suo, räme, turve...)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Tiivistämättömät ja ei- aggressiiviset täytemaat (savi, liuske, hiekkä, siltti...)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Tiivistämättömät ja aggressiiviset täytemaat (tuhka, kuona...)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75
Huomautukset: 1) Korroosionopeudet tiivistetyissä täytöissä ovat hitaampia kuin tiivistämättömissä. Tiivistetyissä taulukon luvut jaetaan kahdella. 2) 5 ja 25 vuoden arvot perustuvat mittauksiin, kun taas muut arvot on ekstrapoloitu.					

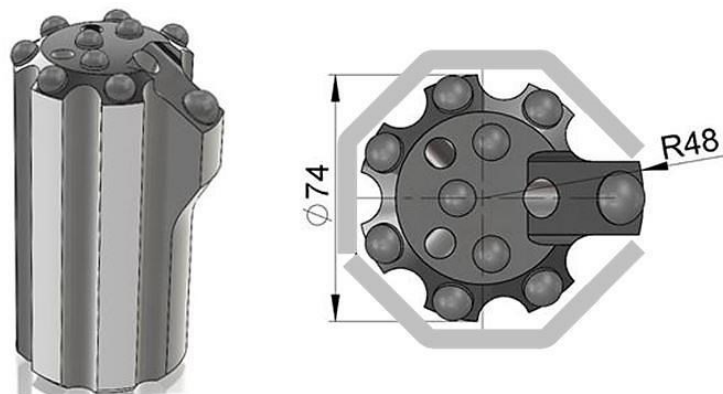
Taulukko 2.5. Veteen asennettujen teräspaalujen korroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemisen suositeltavat arvot [mm] (SFS-EN 1993-5, taulukko 4-2).

Suunniteltu käyttöikä	5 v.	25 v.	50 v.	75 v.	100 v.
Tavallinen makea vesi (joki, laivakulkuinen kanava...) suuren rasituksen alueella (vesiraja)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Erittäin saastunut makea vesi (viemäri, teollisuusjätevesi...) suuren rasituksen alueella (vesiraja)	0,30	1,30	2,30	3,30	4,30
Merivesi lauhkeassa ilmastossa suuren rasituksen alueella (matala vesi ja roiskealueet)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
Merivesi lauhkeassa ilmastossa pysyvästi veden alla olevalla alueella tai vuoristoalueella	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50
Huomautukset: 1) Korroosionopeus on yleensä suurin roiskealueella tai vuorovesialueella laskuvien tasolla. Useimmissa tapauksissa suurimmat taivutusjännitykset kuitenkin esiintyvät pysyvästi veden alla olevalla alueella. 2) 5 ja 25 vuoden arvot perustuvat mittauksiin, kun taas muut arvot on ekstrapoloitu.					

Kun teräspaaluja suunnitellaan käytettäväksi Suomen rannikkoalueella, tulee ottaa huomioon happamien sulfaattimaiden aiheuttama korroosio. Happamilla sulfaattimailla tarkoitetaan maaperässä esiintyviä rikkipitoisia savi-, siltti- ja liejakerrostumia, jotka ovat usein muodostuneet muinaiselle merenpohjalle, merenlahtiin tai jokisuistoihin. Happamien sulfaattimaiden hapettuessa sulfidikerroksen pH laskee keskimäärin arvosta 6-7 välille 3,5–4,5. Happamissa ($\text{pH} < 5$) olosuhteissa korroosio voi olla sekä teräs- että betonirakenteilla runsasta (Leino 1998, s. 57). Geologian tutkimuskeskuksen laatiman karttapalvelun perusteella happamia sulfaattimaita esiintyy Suomessa koko rannikkoalueella ja ne ulottuvat Perämerellä 100 m tasoon merenpinnan yläpuolelle ja Etelä-Suomen rannikolla 20–40 metrin tasoon. (Geologian tutkimuskeskus 2012.)

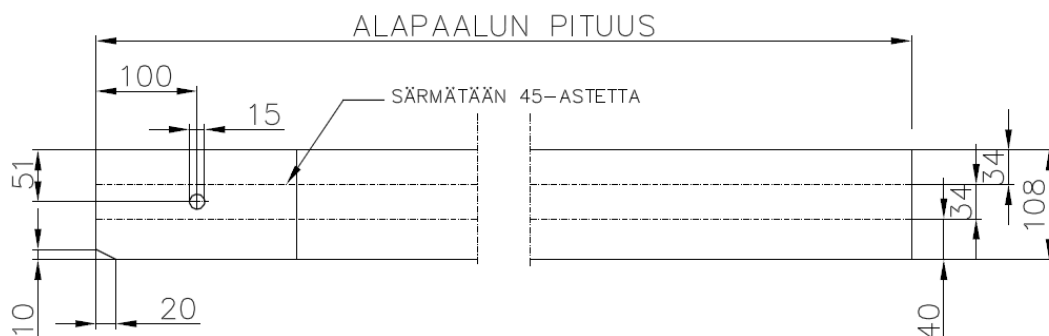
2.4 Asennus- ja jatkostekniikka

C-paalu asennetaan pääsääntöisesti poraamalla. Paalut porataan maahan tai kallioon epäkeskeisellä porausmenetelmällä. Kallioon porattaessa porapaalut upotetaan tavallisesti noin 0,5 metrin syvyyteen (Jääskeläinen 2009, s. 113). Porakärjessä on kuvan 2.6 mukainen avarrinkruunu, joka laajentaa poran tekemän reiän C-paalun halkaisijaa suuremmaksi. Porakärki saadaan nostettua ylös ohjaamalla avarrinosa C-paalun hahloon.



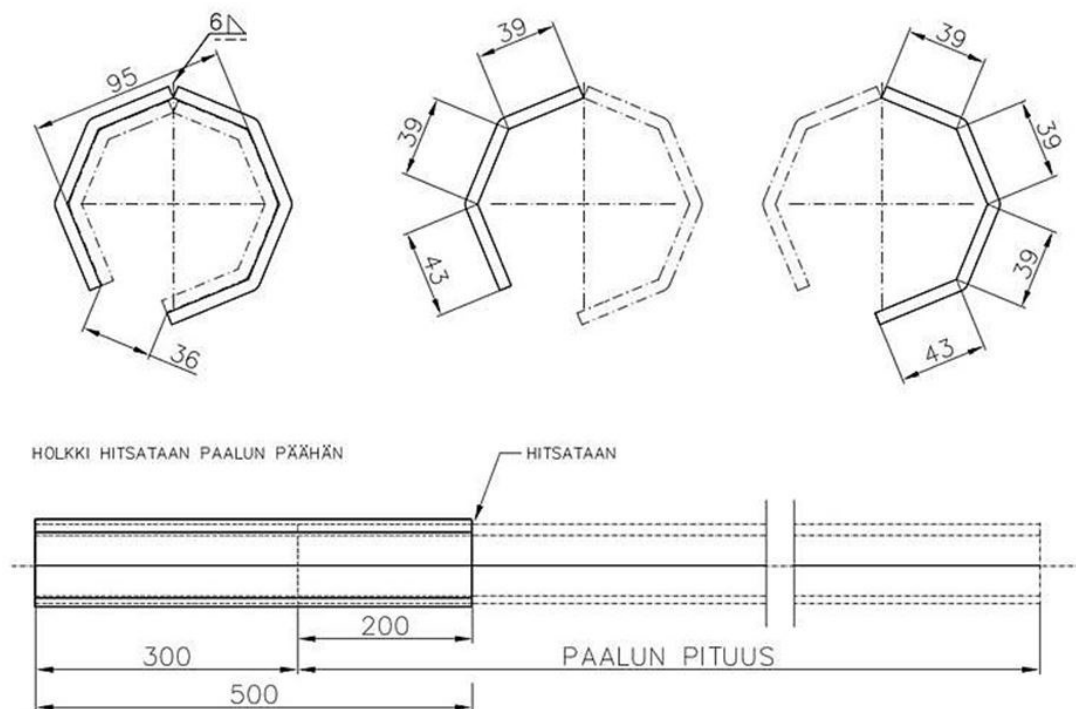
Kuva 2.6. C-paalu ja porakärki (Robit Rocktools Oy).

C-paalun asennus aloitetaan käyttämällä kuvan 2.7 mukaista alapaalua. Alapaalun kärki on viistetty helpottamaan porakärjen poistamista. Viiste ohjaa porakärjen avarrinpaalan helpommin C-paalun uraan.



Kuva 2.7. Tutkittavan C-paalun alapaalun valmistuskuva (Emeca Oy).

C-paalu jatketään käyttämällä holkkijatkosta, joka hitsataan tehtaalla paaluun. Jatkopaa-
lu asennetaan maassa tai kalliossa olevaan alapaalun tai toiseen jatkospaaluun. Jatketta-
vien paalujen päät painetaan yhteen holkin sisällä, jonka jälkeen holkkijatkos hitsataan
kiinni jatkettavaan paaluun. C-paalu voidaan injektoida sisä- ja ulkopuolelta sementillä
porauksen aikana. Porakärjen noston jälkeen paalun yläpäähän voidaan asentaa paalu-
hattu. Paaluhattulla voidaan estää esimerkiksi teräspaalun läpileikkautuminen anturasta
tai paalulaatasta (Jääskeläinen 2009, s. 108). C-paalulle ei ole vielä kehitetty standardi-
muotoista paaluhattua. Holkkijatkos valmistetaan samalla valmistustekniikalla ja samo-
ja materiaaleja käyttäen kuin C-paalu. Holkkijatkoksen poikkileikkaus ja liittyminen
jatkospaaluun on esitetty kuvassa 2.8.



Kuva 2.8. Tutkittavan C-paalun jatkoksen ja jatkospaalun valmistuskuva (Emeca Oy).

3 Teräspaalun tuotteistaminen

3.1 Rakennustuotteiden tuotehyväksyntä

Suomen maankäyttö- ja rakennuslain mukaan pysyväksi osaksi rakennuskohdetta tarkoitettujen rakennustuotteiden tulee olla turvallisia ja terveellisiä sekä ominaisuuksiltaan sellaisia, että rakennuskohde täyttää maankäyttö- ja rakennuslaissa säädetty *olennaiset tekniset vaatimukset*. Rakennustuotteiden voidaan katsoa soveltuvan rakentamiseen, kun ne täyttävät maankäyttö- ja rakentamislain pykälän 117§ olennaisista teknisistä vaatimuksista

- rakenteiden lujuutta ja vakautta
- paloturvallisuutta
- terveellisyyttä
- käyttöturvallisuutta
- esteettömyyttä
- meluntorjuntaa ja ääniolosuhteita
- energiatehokkuutta koskevat vaatimukset.

(Maankäyttö- ja rakennuslaki, 117§ ja 152§.)

Rakennustuotteen kelpoisuuden toteamiseksi on voimassa eri menettelytapoja sen mukaan, kuuluuko rakennustuote harmonisoidun tuotestandardin (hEN) piiriin. Harmonisoidun tuotestandardin piiriin kuuluvien rakennustuotteiden kelpoisuus osoitetaan CE-merkinnällä. CE-merkintä tuotteessa osoittaa, että tuote täyttää sille asetetut olennaiset vaatimukset, tuote on sitä koskevien EU:n direktiivien mukainen ja että tuote on arvioitu vaatimusten mukaisesti. Tuotteen CE-merkinnällä valmistaja ilmoittaa tuotteen ominaisuudet yhdenmukaisella eurooppalaisella tavalla, mikä helpottaa tuotteiden vertailua ja tuotteen markkinoille saamista kaikissa Euroopan talousalueen maissa. CE-merkintä on pakollinen mm. koneissa, sähkölaitteissa, leluissa, henkilönsuojaimissa ja painelaitteissa. Rakennustuotteiden osalta se on vaadittu 1.7.2013 alkaen, jolloin Euroopan Unionin rakennustuoteasetus astui voimaan. (CE-merkittyjen rakennustuotteiden oikea käyttö 2013, s. 6–9.)

Rakennustuotteiden, jotka eivät kuulu harmonisoidun tuotestandardin piiriin, kelpoisuus voidaan todeta kansallisella hyväksyntämenettelyllä kolmella eri tavalla:

- tyyppihyväksynnällä
- varmennustodistuksella
- valmistuksen laadunvalvonnalla.

(Laki eräiden rakennustuotteiden tuotehyväksynnästä, 2§ ja 3§.)

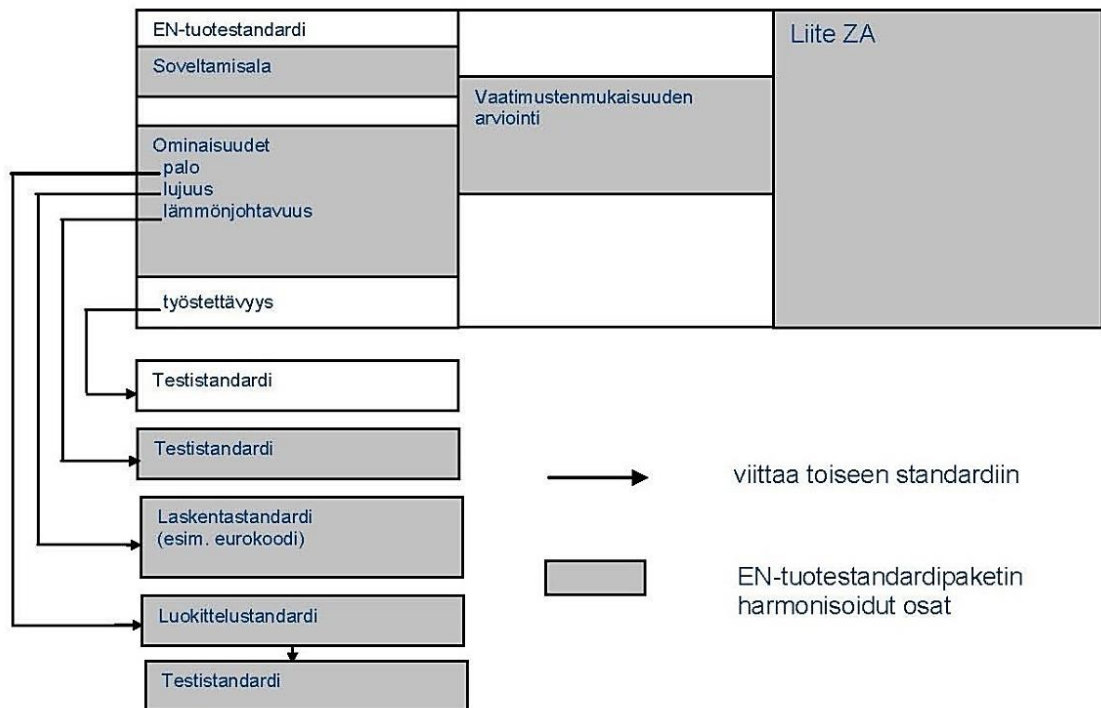
CE-merkinnän käytön edellytykset

EU:n rakennustuoteasetuksen myötä rakennustuotteiden CE-merkintä on pakollista niiden tuotteiden osalta, joille on harmonisoitu tuotestandardi ja joiden siirtymäaika on päättynyt sekä tuotteita, joiden valmistajalle on myönnetty Eurooppalainen tekninen arviointi (ETA). Rakennustuoteasetuksen mukaan tuotteen ilmoitetut arvot tulee esittää suoritustasoilmoituksessa (DoP) ja tuotteen mukana kulkeva CE-merkintä liittyy tuot-

teen sitä koskevaan suoritustasoilmoitukseen. Rakennustuotteen valmistaja tarvitsee ilmoitetulta laitokselta varmentamistodistuksen ennen CE-merkinnän käyttöönottoa, kun rakennustuotteiden suoritustason pysyvyys arvioidaan ja varmennetaan käyttämällä tason 2+, 1 ja 1+ AVCP-luokkaa (ks. kohta ”Rakennustuotteiden suoritustason pysyvyyden arviointi- ja varmennusjärjestelmät”). (CE-merkittyjen rakennustuotteiden oikea käyttö 2013, s. 9–12.)

CE-merkinnän hakumenettelyt

Rakennustuotteille haetaan CE-merkintää ensisijaisesti osoittamalla, että rakennustuote toteuttaa harmonisoidussa tuotestandardissa määritetyt CE-merkinnän edellyttämät tuoteominaisuudet sekä laadunvalvonta- että koemenettelyt. Harmonisoidun tuotestandardin lopussa on liite ZA, joka määrittää, mitä osia standardista on noudatettava, jotta tuotteen voi CE-merkitä. Kuvassa 3.1 on esitetty rakennustuotteiden harmonisoidun tuotestandardin rakenne.



Kuva 3.1. Rakennustuotteiden harmonisoidun tuotestandardin rakenne (CE-merkittyjen rakennustuotteiden oikea käyttö 2013, Liite 1, Kuva 1.1).

Mikäli rakennustuote tai sen osa ei kuulu minkään harmonisoidun tuotestandardin piiriin, voidaan CE-merkintää hakea eurooppalaisen teknisen arvioinnin (ETA) kautta. ETA on vapaaehtoinen CE-merkintään johtava menettelytapa, joka on tarkoitettu erityisesti uusille, innovatiivisille tuotteille. (CE-merkittyjen rakennustuotteiden oikea käyttö 2013, s. 12–15.)

EU:n rakennustuoteasetuksen artiklan 5 mukaan CE-merkinnän pakollisuuteen on kolme poikkeusta (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 305/2011, Luku 2, 5 artikla):

- a) Rakennustuote valmistetaan ei-sarjavalmisteisena yksilöllisesti tiettyyn rakennuskohteeseen ja valmistaja asentaa sen itse paikoilleen.
- b) Rakennustuote valmistetaan rakennuspaikalla.
- c) Rakennustuote valmistetaan perinteiseen tapaan suojeltuun rakennuskohteeseen.

Rakennesuunnittelun sisältyminen CE-merkintään

Kantaville rakennustuotteille on olemassa neljä erilaista CE-merkintätapaa: menetelmät 1, 2, 3b ja 3a. Merkintätapa riippuu siitä, miten tuotteen kantokyky ilmoitetaan ja sisältykö niiden ilmoitus CE-merkintään. Taulukossa 3.1 on esitetty valmistajan ilmoitus rakenteellisten kokoonpanojen ominaisuuksista CE-merkinnässä eri menetelmille.

Taulukko 3.1. Valmistajan ilmoitus rakenteellisten kokoonpanojen ominaisuuksista CE-merkinnässä eri menetelmille (SFS-EN 1090-1, taulukko A.1).

Toiminta	Valmistajan tehtävät ja toimituksen sisältö			
	Menetelmä 1	Menetelmä 2	Menetelmä 3b	Menetelmä 3a
Kokoonpanon rakenteellista suunnittelua koskevat laskelmat	Ei	Kyllä Perustuen vaatimukseen käyttää tuotestandardia, jossa viitataan soveltuviin eurokoodien osiin	Kyllä Perustuen vaatimukseen käyttää ostajan suunnitteluselostetta tai valmistajan suunnitteluselostetta asiakkaan tilauksen vaatimusten täyttämiseksi	Ei
Valmistuksen peruste	MPCS	MPCS	MPCS	PPCS
Kokoonpanon ominaisuuksia koskeva ilmoitus	Geometriaa ja materiaaleja koskevat tiedot ja kaikki muut tiedot, joita tarvitaan, jotta jotkut toiset voivat suorittaa rakenteellisen arvioinnin ja laskelmat	Toimitettavat kokoonpanot ovat eurooppalaisen standardin mukaisia. Rakenteellisten ominaisuuksien osalta viitataan eurokoodien osiin ja kestävyudet annetaan ominaisarvoina tai mitoitussarvoina	Toimitettu kokoonpano on MPCS:n mukainen ja jäljitettävissä ostajan tilaukseen	Toimitettu kokoonpano on PPCS:n mukainen
MPCS = Valmistajan laatima kokoonpanoeritelelmä eli asiakirja tai asiakirjat, jotka sisältävät kaiken tarvittavan tiedon ja tekniset vaatimukset, joita rakenteellisen kokoonpanon valmistuksessa tarvitaan				
PPCS = Ostajan toimittama kokoonpanoeritelmä.				

Taulukon 3.1 mukaan menetelmissä 2 ja 3b tuotteen mitoitus kuuluu CE-merkintään eli tuotteen valmistaja vastaa tuotteen kantavuuden mitoituksista. Menetelmissä 1 ja 2 valmistaja ei välttämättä tiedä tuotteen käyttökohdetta kun taas menetelmissä 3b ja 3a rakennustuotteet ovat kohdekohtaisesti suunniteltuja. (CE-merkittyjen rakennustuotteiden oikea käyttö 2013, s. 20–21, SFS-EN 1090-1, s. 38.)

Kantavien CE-merkittyjen tuotteiden käyttö rakennesuunnittelussa ei muuta rakennesuunnittelijan vastuita ja tehtäviä. Vastaavan rakennesuunnittelijan on huomioitava, että rakennustuotteiden CE-merkintä kertoo ainoastaan tuotteen ominaisuuksista eikä siten ole automaattisesti osoitus tuotteen kohdekohtaisesta määräystenmukaisuudesta. Rakennesuunnittelijan on huolehdittava, että suunniteltavassa rakenteessa käytetyt osakomponentit muodostavat toimivan kokonaisuuden, joka täyttää rakentamiselle asetetut vaatimukset. (CE-merkittyjen rakennustuotteiden oikea käyttö 2013, s.12, 20–23).

Rakennustuotteiden suoritustason pysyvyyden arviointi- ja varmennusjärjestelmät

EU:n rakennustuoteasetuksessa on määritelty viisi eri järjestelmää (1+, 1, 2+, 3 ja 4) eli niin sanottua AVCP-luokkaa CE-merkityn rakennustuotteen suoritustason pysyvyyden ja varmentamisen osoittamiseksi (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 305/2011, Liite 5). Suoritustason pysyvyydellä ja varmentamisella osoitetaan, että tuotteen valmistus, ominaisuudet ja niiden valvonta vastaa yhdenmukaistetussa standardissa tai eurooppalaisessa teknisessä hyväksynnässä esitettyjä vaatimuksia. AVCP-luokituksessa rakennustuotteelle suoritettavien varmentamistoimien laajuus sekä ilmoitetun laitoksen rooli vaihtelevat vaaditun menettelyn mukaan. Tuoteryhmittäin vaihtelevat AVCP-luokat on esitetty taulukossa 3.2. Rakennustuoteryhmiin sovellettavat AVCP-luokat on esitetty harmonisoidun tuotestandardin liitteessä ZA. Taulukossa 3.2 esitetyt ilmoitetut laitokset (kolmannet osapuolet) löytyvät maakohtaisesti Euroopan komission ylläpitämältä Nando-sivustolta (Nando-sivusto, maakohtaiset ilmoitetut laitokset).

Taulukko 3.2. AVCP-luokat (CE-merkittyjen rakennustuotteiden oikea käyttö, 2013, liite 2, kuva 2.1).

Kontrollikeinot	1+	1	2+	3	4
Tehtaan sisäinen dokumentoitu laadunvalvonta	V	V	V	V	V
Tehtaalla testausohjelman mukainen lisätестaus	V	V	V		
Tuotetyypin määrittäminen tyyppitestauksen, laskennan, taulukkoarvojen jne. perusteella	TS	TS	V	L	V
Tehtaan sisäisen laadunvalvonnan alkutarkastus	TS	TS	LS		
Tehtaan sisäisen laadunvalvonnan jatkuva valvonta, arviointi ja hyväksyntä	TS	TS	LS		
Pistokoetestaus ennen tuotteen saattamista markkinoille	TS				
V = valmistaja L = testauslaboratorio LS = laadunvalvonnan sertifiointilaitos TS = tuotesertifiointilaitos					

Rakennustuotteen CE-merkinnän vaiheet

Haettaessa rakennustuotteelle CE-merkintää voidaan prosessi jakaa tiivistetysti kuuteen eri vaiheeseen (CE marking makes Europe's market yours 2011, s. 4):

1. Rakennustuotteelle soveltuvien direktiivien ja harmonisoidun tuotestandardin tunnistaminen
2. Tuotteelle asetettujen olennaisten vaatimusten täyttymisen osoittaminen
3. Tuotekohtaisen vaatimusten arviointimenetelmän (AVCP-luokan) selvittäminen
4. Tuotteen testaus ja vaatimustenmukaisuuden tarkistaminen
5. Kokoonpanoeritelmän laatiminen
6. CE-merkinnän kiinnittäminen tuotteeseen ja vaatimustenmukaisuutta koskevan ilmoituksen tekeminen

3.2 C-paalun CE-merkintä standardin SFS-EN 1090-1 mukaan

C-paalu kuuluu harmonisoidun tuotestandardin SFS-EN 1090-1 piiriin. Yhdenmukaisesti eurooppalainen standardi SFS-EN 1090-1 koskee teräs- ja alumiinirakenteiden toteutusta ja siinä käsitellään rakenteellisten kokoonpanojen vaatimustenmukaisuuden arviointia koskevia vaatimuksia. Standardin lopussa olevassa liitteessä ZA esitetään teräs- ja alumiinirakenteeksi sekä teräs-betoni-liittorakenteeksi tarkoitettujen rakenteellisten metallisten rakennekokoonpanojen CE-merkinnän käyttöedellytykset. SFS-EN 1090-1 ei sisällä rakenteellista suunnittelua ja valmistuksia koskevia sääntöjä vaan ne esitetään suunnitteluvaatimusten osalta EN-eurokoodien soveltuvissa osissa ja teräsrakenteiden toteutusvaatimusten osalta standardissa EN 1090-2.

Tuotestandardin EN 1090-1 siirtymäajan alkamispäivä on 1.7.2014. Harmonisoitujen tuotestandardien siirtymäaikojen alkamispäivät löytyvät Euroopan komission ylläpitäältä Nando-sivustolta. (Nando-sivusto, harmonisoidut tuotestandardit).

Olennaiset vaatimukset ja niiden arviointimenetelmät

Standardissa SFS-EN 1090-1 ja sen liitteessä ZA esitetään kaikki teräskokoonpanoa koskevat vaatimuskohdat, joita edellytetään CE-merkinnässä. Tässä tutkimuksessa keskitytään C-paalun rakenneteknisen kantokestävyyden määrittämiseen ja käsitellään olennaisia vaatimuksia koskien

- teräskokoonpanossa käytettäviä tuotteita
- mittojen ja muotojen toleransseja
- rakenteellisista ominaisuuksista teräskokoonpanon kantavuutta
- toiminnallisten ominaisuuksien säilyvyyttä.

Taulukossa 3.3 on esitetty C-paalun toiminnalliset ominaisuudet ja niitä koskevat standardin EN 1090-1 vaatimuskohdat, joita edellytetään CE-merkinnässä.

Taulukko 3.3. Standardin SFS-EN 1090-1 ja sen liitteen ZA toiminnalliset ominaisuudet ja niitä koskevat vaatimuskohdat standardissa (SFS-EN 1090-1, s. 16–24, 50).

Toiminnallinen ominaisuus		Vaatimuskohta standardissa SFS-EN 1090-1
Teräskokoonpanossa käytettävät tuotteet		4.1.2, 5.2
Mittojen ja muotojen toleranssit		4.2, 5.3
Hitsattavuus		4.3, 5.4
Murtumissitkeys		4.4, 5.5
Iskunkestävyys		4.8, 5.10
Rakenteelliset ominaisuudet	Kantavuus	4.5.1, 4.5.2, 5.6.2
	Väsymislujuus	4.5.1, 4.5.3, 5.6.2
	Palonkestävyys	4.5.1, 4.5.4, 5.7
	Muodonmuutos käyttörajatilassa	4.5.5
Palokäyttäytyminen		4.6, 5.8
Vaaralliset aineet		4.7, 5.9
Säilyvyys		4.9, 5.11

Vaatimustenmukaisuuden osoittamismenettelynä käytetään C-paalun tapauksessa teräskokoonpanoille käytettävää taulukon 3.2 mukaista AVCP-luokkaa 2+, (SFS-EN 1090-1, taulukko ZA.2). Vaatimustenmukaisuus tulee osoittaa alkutestauksella ja tehdas sisäisellä laadunvalvonnalla. Alkutestauksen tarkoituksena on arvioida ja osoittaa, että valmistaja kykenee valmistamaan standardin mukaisia rakenteellisia kokoonpanoja ja tuotejärjestelmiä (SFS-EN 1090-1, s. 26). C-paalun toiminnallisten ominaisuuksien arviointimenetelmät on esitetty liitteen 1 taulukossa.

Tehtaan sisäisen laadunvalvonnan tarkoituksena on varmistaa, että valmistetut tuotteet ovat niille ilmoitettujen ominaisuuksien mukaisia. Valmistajan vastuulla on luoda, dokumentoida ja ylläpitää tehdas sisäistä laadunvalvontajärjestelmää. Käytettäväksi suositellaan standardin EN ISO 9001 vaatimukset täyttävää laadunvalvontajärjestelmää. (SFS-EN 1090-1, s.30–32). Liitteessä 2 on esitetty tehdas sisäisen laadunvalvonnan sisältämän tuotetestauksen arviointimenetelmät C-paalun toiminnallisille ominaisuuksille soveltaen standardin SFS-EN 1090-1 taulukkoa 2.

Teräskokoonpanossa käytettävät tuotteet

Teräskokoonpanon valmistuksessa on käytettävä standardin EN 1090-2 esitettyjen eurooppalaisten standardien mukaisia tuotteita (SFS-EN 1090-1, kohta 4.1.2). C-paalun valmistuksessa käytetään särmäämällä kylmämuovattuja teräslevyjä (kohta 2.1). Teräslevyjen materiaali S355MC kuuluu standardin SFS-EN 1090-2 mukaisiin kylmämuovaukseen soveltuvien levyjen ja nauhojen tuotteisiin. Lujille kylmämuovattaville teräksille esitetään tekniset toimitusvaatimukset standardissa EN 10149. (SFS-EN 1090-2, taulukko 3.)

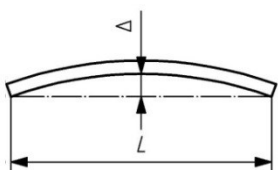
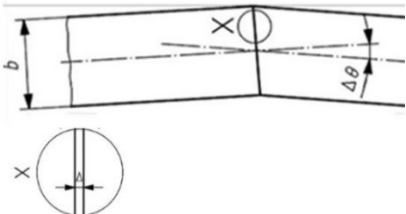
Valmistuksessa käytettävillä terästuotteilla tulee olla standardin EN 10204 mukainen ainestodistus, jotta tuotteen ominaisuuksia voidaan verrata esitettyihin vaatimuksiin (SFS-EN 1090-2, s. 21). Taulukon 3.3 toiminnallisista ominaisuuksista voidaan luottaa hitsattavuuden ja murtumissitkeyden osalta käytettävien materiaalien ja kokoonpanojen ominaisuuksiin, kun ne on esitetty ainestodistuksen perusteella. Mikäli tuotteen murtumissitkeysominaisuuksia ei ole käytettävissä, voidaan iskusitkeys määrittää standardin EN 10045-1 mukaisesti suoritetulla Charpy-iskukokeilla. Käytettävien hitsausaineiden tulee olla standardin EN 13479 ja standardin EN 1090-2 taulukossa 5 esitettyjen soveltuvien tuotestandardien vaatimusten mukaisia. (SFS-EN 1090-1, kohdat 5.4, 5.5.)

Mittojen ja muotojen toleranssit

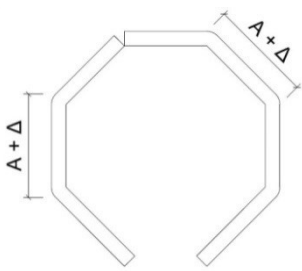
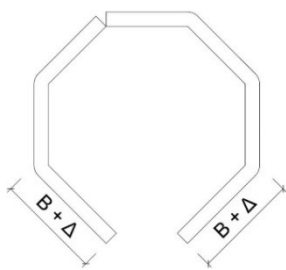
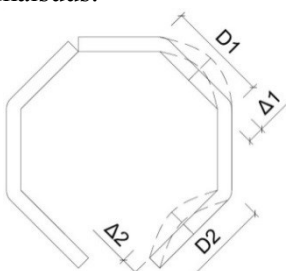
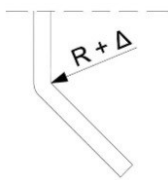
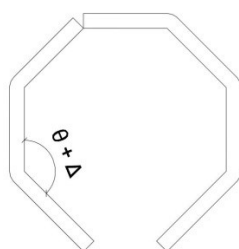
C-paalun mittojen ja muotojen toleranssien tulee noudattaa standardissa EN 1090-2 esitettyjä olennaisia sekä toiminnallisia vaatimuksia. Olennaisilla toleransseilla tarkoitetaan valmiin rakenteen mekaaniseen kestävyys- ja stabiiliuteen vaikuttavia poikkeamia. Toiminnallisilla toleransseilla sen sijaan tarkoitetaan muiden vaatimusten, kuten yhteen sopimisen ja ulkonäöllisten vaatimusten, täyttymiseen vaikuttavia poikkeamia. (SFS-EN 1090-2, s. 76.)

Standardin SFS-EN 1090-2 liitteen D mukaisia olennaisten ja toiminnallisten toleranssien sallittuja mittapoikkeamia on sovellettu C-paalulle taulukossa 3.4. Taulukossa 3.4 on esitetty tukemattoman C-paalun suoruudelle sekä jatkoskohdan tukipinnalle sovellettavat vaatimukset sekä C-paalun poikkileikkaukselle sovellettavat mitoittavat arvot olennaisten ja toiminnallisten toleranssien arvoista. Standardin liitteessä D esitetään toleranssien arvot yleensä kahdelle luokalle. Standardin mukaan tilanteessa, jossa luokkaa ei ole esitetty, on noudatettava luokan 1 arvoja (SFS-EN 1090-2, kohta 11.3.2). Koska C-paalun toleransseille ei ole esitetty toleranssiluokkaa, on taulukon 3.4 sallitut poikkeamat määritetty 1 luokan mukaan.

Taulukko 3.4. C-paalun geometriset toleranssit (SFS-EN 1090-2, liite D).

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ
Tukemattoman kokoonpanon suoruus: 	Suoruuspoikkeama Δ Kokoonpanon pituus L	$\Delta = \pm L / 750$ Esimerkiksi: $\Delta(L=2\text{m}) = \pm 2,67 \text{ mm}$ $\Delta(L=4\text{m}) = \pm 5,33 \text{ mm}$ $\Delta(L=6\text{m}) = \pm 8 \text{ mm}$
Jatkoksen tukipinnat: 	Paikallinen kulmapoikkeama $\Delta\theta$, kun kohdassa X on samalla rako Δ	$\Delta\theta = \pm 1/500 \text{ rad}$ ja: <ul style="list-style-type: none"> $\Delta = 0,5 \text{ mm}$ vähintään 2/3 kosketuspinnasta $\Delta = 1,0 \text{ mm}$, suurin arvo paikallisesti

(jatkuu)

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ
Tuetun taso-osan leveys: 	Taitteiden välinen leveys A A = 42,5 mm	Positiivinen arvo: $\Delta = +5 \text{ mm}, L < 7 \text{ m}$ $\Delta = +9 \text{ mm}, L \geq 7 \text{ m}$ Negatiivinen arvo: $\Delta = -A / 50 = -0,85 \text{ mm}$
Vapaareunaisen taso-osan leveys: 	Taivutuksen ja vapaan reunan välinen leveys B B = 44,2 mm	Positiivinen arvo: $\Delta = +7 \text{ mm}$ Negatiivinen arvo: $\Delta = -B / 80 = -0,55 \text{ mm}$
Tasomaisuus: 	Kuperuus tai koveruus D D1 = 42,5 mm D2 = 44,2 mm	$\Delta = \pm D / 50$ $\Delta 1 = \pm D1 / 50 = 0,85 \text{ mm}$ $\Delta 2 = \pm D2 / 50 = 0,88 \text{ mm}$
Taivutussäde: 	Sisäpuolinen taivutussäde R	$\Delta = \pm 2 \text{ mm}$
Muoto: 	Viereisten taso-osien välinen kulma θ	$\Delta = \pm 3^\circ$

Standardin EN 1090-2 mukaiset mittojen ja muotojen toleranssit tulee tarkistaa standardeissa ISO 7976-1 ja ISO 7976-2 esitettyjä menetelmiä ja mittausvälineitä käyttäen.

Mittausten tarkkuuden arviointi tulee suorittaa standardin ISO 17123-1 mukaisesti. Kimmoiset muodonmuutokset, jotka johtuvat kokoonpanon omasta painosta, eivät sisälly mittojen ja muotojen toleransseihin. (SFS-EN 1090-1, kohta 5.3, SFS-EN 1090-2, kohta 11.1.)

Kantavuus

Teräskokoonpanojen rakennetekninen kantavuus voidaan ilmoittaa joko kokoonpanon poikkileikkauksen kestävyysarvona tai vaihtoehtoisesti kuormitusten arvoina, jotka kokoonpano kestä. Kestävyyden ja kuormitusten arvot voidaan ilmoittaa ominais- tai laskenta-arvoina. Teräskokoonpanojen rakenneteknisen kantavuuden arviointi voidaan osoittaa

- rakenteellisilla laskelmilla
- rakenteellisella testauksella, joka tukee kokoonpanon rakenteellisia laskelmia.

(SFS-EN 1090-1, kohta 4.5.2 ja 5.6.)

Rakenteellisten laskelmien tulee olla soveltuvien eurokoodien mukaisia. Käytännössä tämä edellyttää taulukon 3.5 mukaisten standardien soveltuvien osien käyttöä noudattaen kokoonpanon käyttömaan mukaisten eurokoodien kansallisten liitteiden säädöksiä (SFS-EN 1090-1, kohta 5).

Taulukko 3.5. C-paalun rakenteellisissa laskelmissa edellytettävät standardit.

Eurokoodi	Standardin sisältö
EN 1990	Suunnittelun perusteet
EN 1991	Rakenteiden kuormitukset
EN 1993	Teräsrakenteiden suunnittelu (injektoimaton C-paalu)
EN 1994	Betoni-teräs-liittorakenteiden suunnittelu (injektoitu C-paalu)
EN 1997	Geotekninen suunnittelu
EN 1998	Rakenteiden suunnittelu maanjäristyksen kestäväksi

Diplomityössä tutkittavan injektoimattoman C-paalun rakenneteknistä kantavuutta käsittelevät standardit ovat taulukossa 3.5 esitetyn eurokoodin EN 1993 osia. Rakenneteknisen kantokestävyyden määrittämisessä olennaisimmat standardit ovat

- EN 1993-1, Yleiset säännöt
 - EN 1993-1-1, Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt
 - EN 1993-1-2, Rakenteen palomitoitus
 - EN 1993-1-5, Levyrakenteet
 - EN 1993-1-8, Liitosten suunnittelu
 - EN 1993-1-9, Teräsrakenteiden väsyminen
 - EN 1993-1-10, Materiaalin sitkeys ja paksuussuuntaiset ominaisuudet
- EN 1993-5, Paalut.

Rakenteellisten ominaisuuksien kuten kantavuuden osoittaminen rakenteellisella testauksella tulee perustua eurooppalaisiin standardeihin, mutta yleistä rakenteellista testausstandardia ei ole tällä hetkellä olemassa (SFS-EN 1090-1, kohta 5.6.2.2). C-paalun kohdalla kuitenkin jatkoksen kestävyys- ja jäykkyyden arvioimiselle on esitetty testaus-

menetelmä standardin EN 1993-5 Suomen kansallisessa liitteessä (NA SFS-EN 1993-5-YM, kohta 7.4.2). Jatketun paalun taivutuskoea käsitellään tarkemmin diplomityön kohdassa 5.4. Kokoonpanolle suoritettavia koejärjestelyitä suunniteltaessa on huomioitava, että rakenteellisen testauksen tulee tukea rakenteellisia laskelmia (SFS-EN 1090-1, kohta 5.6.2).

Säilyvyys

Teräskokoonpanon säilyvyys määräytyy korroosion kestosta. Säilyvyyden arvioimiselle ei ole suoraa standardien mukaista menetelmää (SFS-EN 1090-1, kohta 5.11). C-paalu mitoittaessa tulee kuitenkin noudattaa teräspaaluja koskevan standardin SFS-EN 1993-5 mukaisia korroosion aiheuttaman seinämäpaksuuden vähennysarvoja olosuhteiden ja käyttöiän suhteessa elleivät paikalliset olosuhteet muuta edellytä (NA SFS-EN 1993-5, kohta 4.4). Seinämäpaksuuden vähennysarvot on esitetty korroosion kestoa tarkemmin käsittelevässä diplomityön kohdassa 2.3. Korroosion kestoa voidaan parantaa eri pintakäsittelymenetelmillä. Pintakäsittelyille teräskokoonpanoille esitetään vaatimukset standardin EN 1090-2 luvussa 10.

4 Rakenteellisen kantokestävyyden määrittäminen

C-paalun rakenteellista kantokestävyyttä tutkittiin laskemalla aluksi poikkileikkaussuureet, joilla määritetään poikkileikkauksen kestävyys aksiaalikuormalle, taivutusmomentille sekä leikkausvoimalle. Paaluihin kohdistuu usein voimasuureyhdistelmiä, joten yksittäisten kuormitustapausten lisäksi esitetään kaavat kuormien yhteisvaikutuksille. Poikkileikkauksen kestävyyksien lisäksi määritetään C-paalun puristuskestävyys nurjahduksen suhteen eri nurjahduspituuksilla, sillä paalut saattavat nurjahtaa olosuhteissa, joissa paalun sivutuenta on riittämätön (Winterkorn & Fang 1975, s. 560, kuva 19.8). Sivutuenta voidaan katsoa riittämättömäksi, kun paalut ovat osittain tai kokonaan ilmassa, vedessä tai maakerroksessa, jonka redusoitu, siipikairauksella määritetty suljettu leikkauslujuus on pienempi kuin 20 kN/m^2 (RIL 254-1-2011, s. 106). C-paalun nurjahduskestävyyttä tutkitaan Vlasovin taivutusvääntönurjahdusteorialla sekä FEM-laskennalla. Kaikki kantokestävyyden arvot lasketaan C-paalun ominaisarvoilla ja C-paalun valmistuskuvien mukaisilla mitoilla.

4.1 Poikkileikkaussuureet

Poikkileikkaussuureet lasketaan Vlasovin avointen ohutseinämäisten sauvojen teorialla. Vlasov olettaa, että poikkileikkausta kuormittaessa sen projektio y , z –tasossa (vrt. kuva 4.2) säilyttää muotonsa eli projektion liike on jäykän kappaleen tasoliikettä (Vlasov 1961, s. 7-8). Poikkileikkaussuureiden laskelmat välivaiheineen on esitetty liitteessä 3. Tutkittavan poikkileikkauksen seinämävahvuus t on kaikissa laskelmissa 6 mm.

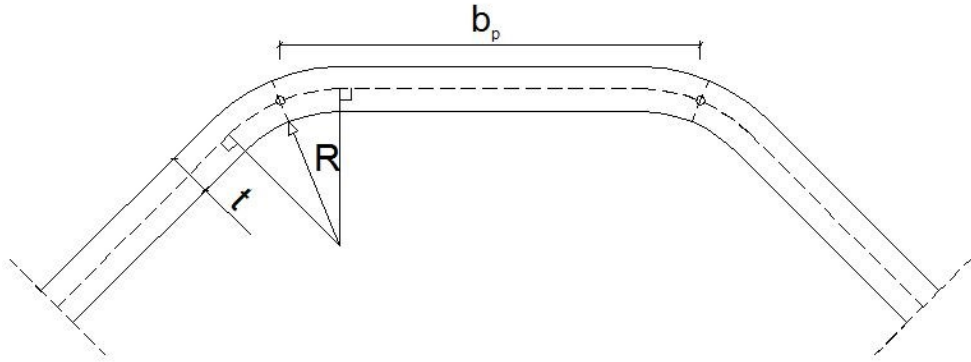
Poikkileikkauksen yksinkertaistaminen

Avointen profiilien poikkileikkaussuureiden käsinlaskemisen helpottamiseksi nurkkapyöristykset jätetään usein huomioimatta. Nurkkapyöristysten huomioimatta jättäminen on perusteltua, kun sisäpuolinen pyöristyssäde R täyttää ehdot:

$$R \leq 5 \times t \quad \text{ja}$$

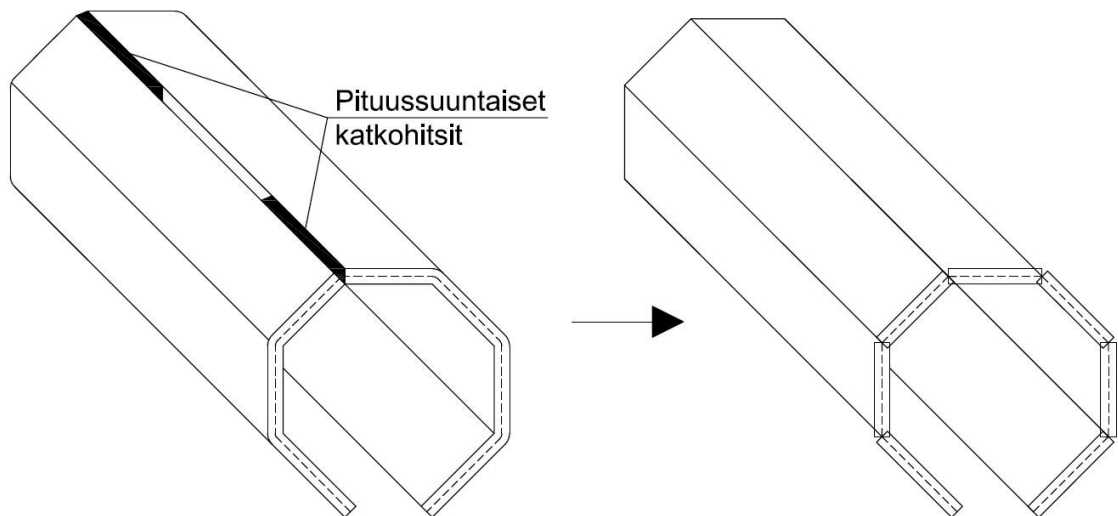
$$R \leq 0,10 \times b_p,$$

missä b_p tarkoittaa kaikkia taso-osia (SFS-EN 1993-1-3, kohta 5.1).



Kuva 4.1. Poikkileikkauksen seinämän paksuus t , sisäpuolinen pyöristyssäde R ja taso-osan leveys b_p .

C-paalun sisäpuolinen pyöristyssäde on hyvin pieni ($R \approx 0$), joten poikkileikkauksen nurkkapyöristykset jätetään huomioimatta ja aineen oletetaan keskittyvän profiilin keskilinjalle. Poikkileikkauksen oletetaan koostuvan terävasärmäisistä osista. Poikkileikkauksuureiden laskennassa jätetään C-paalun pituussuuntainen katkohitsi huomioimatta ja oletetaan poikkileikkauksen nurkan olevan ehjä katkohitsien välissä kuvan 4.2 mukaisesti. Katkohitsin huomioimatta jättämisellä on alle 2 % vaikutus käsinlaskennan tuloksiin.

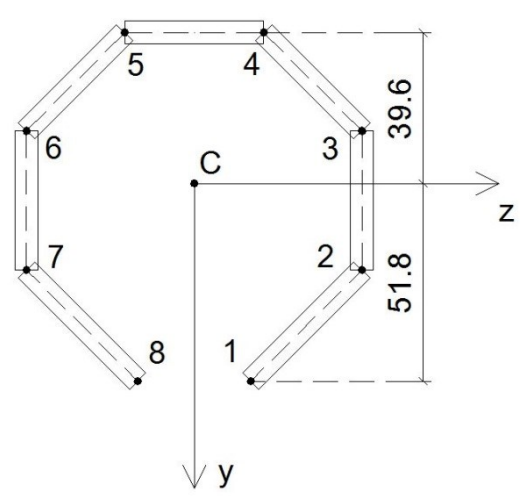


Kuva 4.2. Poikkileikkauksen yksinkertaistaminen käsinlaskennan helpottamiseksi.

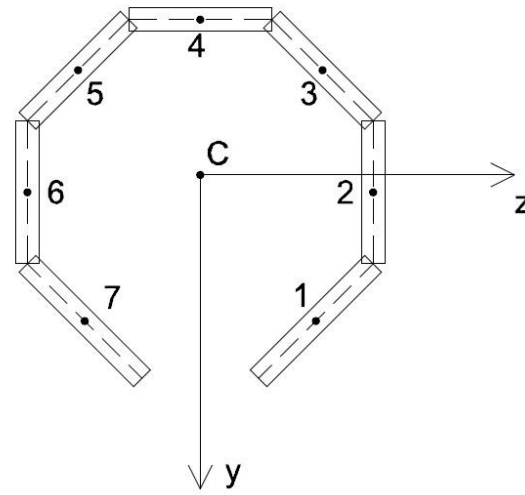
Painopistekoordinaatisto ja yksinkertaistetun poikkileikkauksen mitat

C-paalun yksinkertaistettu poikkileikkaus on siirretty painopistekoordinaatistoon. Taulukossa 4.1 on esitetty profiilin keskilinjän nurkkapisteen koordinaatit painopistekoordinaatistossa ja taulukossa 4.2 laskentaosien pituudet ja pinta-alat. Yksinkertaistetun poikkileikkauksen pinta-ala $A_{p,0} = 1589,4 \text{ mm}^2$ (taulukko 4.2) on ainoastaan 0,34 % suurempi kuin taulukon 2.1 mukainen nurkkapyöristykset huomioiva kokonaispinta-ala $A_{p,w,0} = 1584,0 \text{ mm}^2$.

Taulukko 4.1. Nurkkapisteen koordinaatit painopistekoordinaatistossa.

Piste i	y_i [mm]	z_i [mm]	
1	51,8	14,8	
2	22,6	44,0	
3	-13,8	44,0	
4	-39,6	18,2	
5	-39,6	-18,2	
6	-13,8	-44,0	
7	22,6	-44,0	
8	51,8	-14,8	

Taulukko 4.2. Poikkileikkauksen laskentaosien pituudet ja pinta-alat.

Osa i	s_i [mm]	A_i [mm ²]	
1	41,2	247,2	
2	36,5	219,0	
3	36,5	219,0	
4	36,5	219,0	
5	36,5	219,0	
6	36,5	219,0	
7	41,2	247,2	
$\sum_{i=1}^7$	264,9	1589,4	<p>Paalun kokonaispinta-ala $A_{p,0} = 1589,4 \text{ mm}^2$</p> <p>Paalun keskilinjan piiri $s_p = 264,9 \text{ mm}$</p>

Jäyhyysmomentit ja tulomomentti

Jäyhyysmomentit I_y ja I_z sekä tulomomentti I_{yz} lasketaan kaavoilla (Vlasov 1961, s. 38):

$$I_y = \int_A z^2 dA = \int z^2 t ds, \quad (4.1)$$

$$I_z = \int_A y^2 dA = \int y^2 t ds, \quad (4.2)$$

$$I_{yz} = \int_A yz dA = \int yz t ds. \quad (4.3)$$

Poikkileikkaus on painopisteeseen asetetun koordinaatiston (taulukon 4.1 kuva) y-akselin suhteen symmetrinen, joten painopistekoordinaatisto on myös poikkileikkauksen pääjäyhyyskoordinaatisto. Tällöin poikkileikkauksen jäyhyysmomentit ovat poikkileikkauksen pääjäyhyysmomentit I_1 ja I_2 . Käyttämällä taulukoiden 4.1 ja 4.2 arvoja saadaan kaavojen (4.1), (4.2) ja (4.3) mukaan jäyhyysmomenteille ja tulomomentille arvot:

$$I_1 = I_y = 1,783 \times 10^6 \text{ mm}^4,$$

$$I_2 = I_z = 1,456 \times 10^6 \text{ mm}^4,$$

$$I_{yz} = 0.$$

Sektoriaalinen jäyhyysmomentti

Sektoriaalisen jäyhyysmomentin laskemiseksi on aluksi määritettävä poikkileikkauksen vääntökeskiön sijainti pääjäyhyyskoordinaatistossa sekä vääntökeskiön suhteen määritetyt normeeratut sektoriaaliset koordinaatit. Vääntökeskiön y- ja z-koordinaatit y_V ja z_V lasketaan kaavoilla (Vlasov 1961, s. 42):

$$y_V = y_A + \frac{I_z I_{z\omega'_A} - I_{yz} I_{y\omega'_A}}{I_y I_z - I_{yz}^2}, \quad (4.4)$$

$$z_V = z_A + \frac{I_y I_{y\omega'_A} - I_{yz} I_{z\omega'_A}}{I_y I_z - I_{yz}^2}. \quad (4.5)$$

Vääntökeskiön määrittämiseksi on aluksi laskettava kaavoissa (4.4) ja (4.5) olevat sektoriaaliset tulomomentit vapaasti valittavan napapisteen A ja poikkileikkauksen tasosan keskilinjalta valittavan nollapisteen O' suhteen. Sektoriaalisen koordinaatin arvo nollapisteessä on nolla. Suorista osista koostuvan poikkileikkauksen sektoriaalisen koordinaatin arvo nurkkapisteessä j voidaan laskea kaavalla (4.6), jos sektoriaalisen koordinaatin arvo ω_{Ai} edellisessä nurkkapisteessä i tunnetaan:

$$\omega_{Aj} = \omega_{Ai} \pm h_{Aj} \Delta s_{ij}, \quad (4.6)$$

missä kaavaan tulee + -merkki, mikäli etenemissuunta sektoriaalisen koordinaatin arvon laskemisessa kiertää napapistettä vastapäivään, myötäpäivään kierrettäessä tulee - -merkki.

Kun sektoriaaliset koordinaatit on laskettu poikkileikkauksen nurkkapisteissä, voidaan laskea napa- ja nollapisteen suhteen sektoriaaliset tulomomentit $I_{y\omega'_A}$ ja $I_{z\omega'_A}$ kaavoilla (Vlasov, 1961, s. 39):

$$I_{y\omega'_A} = \int_A y\omega'_A dA = \int y\omega'_A tds, \quad (4.7)$$

$$I_{z\omega'_A} = \int_A z\omega'_A dA = \int z\omega'_A tds. \quad (4.8)$$

Valitsemalla napapisteksi A piste, jonka sijainti painopistekoordinaatistossa on $y_A = 4,4$ mm ja $z_A = 0$ ja nollapisteksi O' , joka sijaitsee taulukon 4.1 kuvan poikkileikkauksen nurkkapisteessä 1 ($y_{O'} = 51,8$ mm, $z_{O'} = -14,8$ mm), saadaan kaavan (4.6) avulla määritettyä sektoriaaliset koordinaatit ω_{Aj} poikkileikkauksen nurkkapisteissä. Tämän jälkeen käyttämällä taulukoiden 4.1 ja 4.2 sekä kaavalla (4.6) määritettyjä arvoja saadaan kaavojen (4.7) ja (4.8) mukaan sektoriaalisille tulomomenteille $I_{y\omega'_A}$ ja $I_{z\omega'_A}$ arvot:

$$I_{y\omega'_A} = 0,$$

$$I_{z\omega'_A} = -1,557 \times 10^8 \text{ mm}^5.$$

Nyt voidaan laskea vääntökeskiön sijainti kaavojen (4.4) ja (4.5) avulla sijoittamalla niihin kaavoilla (4.1), (4.2), (4.3), (4.7) ja (4.8) lasketut arvot sekä napapisteen A koordinaatit y_A ja z_A . Vääntökeskiön sijainniksi painopistekoordinaatistossa saadaan tällöin:

$$y_V = -82,9 \text{ mm},$$

$$z_V = 0 \text{ mm}.$$

Vääntökeskiön sijainnin määrittämisen jälkeen lasketaan sektoriaalinen koordinaatti ω'_V , jonka nollapiste on edelleen O' ja napapiste on vääntökeskiö V ($y_V = -82,9$ mm, $z_V = 0$), napapisteen vaihtokaavalla (Vlasov 1961, s. 45):

$$\omega'_V = \omega'_A + (z_V + z_A)(y + y_0) - (y_V + y_A)(z + z_0). \quad (4.9)$$

Tämän jälkeen normeerataan sektoriaalinen koordinaatti ω'_V siten, että sen nollapistettä vastaava poikkipinnan sektoriaalinen staattinen momentti $S_{\omega'}$ häviää. Normeerattu sektoriaalinen koordinaatti ω_V lasketaan kaavalla:

$$\omega_V = \omega'_V - \frac{S_{\omega'_V}}{A_p}, \quad (4.10)$$

missä $S_{\omega'_V}$ on poikkipinnan sektoriaalinen staattinen momentti, joka lasketaan kaavalla (Vlasov, 1961, s. 32):

$$S_{\omega'_V} = \int_A \omega'_V dA = \int \omega'_V tds. \quad (4.11)$$

Laskemalla sektoriaalinen koordinaatti ω'_{Vi} poikkileikkauksen nurkkapisteissä i kaavalla (4.9) sekä poikkipinnan sektoriaalinen staattinen momentti kaavalla (4.11) ja sijoit-

tamalla niistä saadut arvot kaavaan (4.10) saadaan normeeratut sektoriaaliset koordinaatit ω_{Vi} . Vääntökeskiön sijainti painopistekoordinaatistossa sekä sektoriaaliset koordinaatit ω_{Vi} on esitetty taulukossa 4.3.

Taulukko 4.3. Vääntökeskiön sijainti ja normeeratut sektoriaaliset koordinaatit.

Piste i	$\omega_{Vi} [\text{mm}^2]$	
1	-4535,0	
2	-171,5	
3	1434,5	
4	786,8	
5	-786,8	
6	-1434,5	
7	171,5	
8	4535,0	

Vääntökeskiön sijainnin ja normeeratun sektoriaalisen koordinaatin määrittämisen jälkeen voidaan laskea poikkileikkauksen sektoriaalinen jäyhyysmomentti $I_{\omega V}$ kaavalla (Vlasov 1961, s. 39):

$$I_{\omega} \equiv I_{\omega V} = \int_A \omega_V^2 dA = \int \omega_V^2 t ds. \quad (4.12)$$

Käyttämällä taulukoiden 4.2 ja 4.3 arvoja saadaan kaavan (4.12) mukaan poikkileikkauksen sektoriaalisen jäyhyysmomentin arvoksi:

$$I_{\omega V} = 4,392 \times 10^9 \text{ mm}^6.$$

Staattinen momentti ja sektoriaalinen staattinen momentti

Poikkileikkauksen staattiset momentit S_y ja S_z sekä sektoriaalinen staattinen momentti S_{ω} saadaan laskettua kaavoilla (Vlasov 1961, s. 38–39):

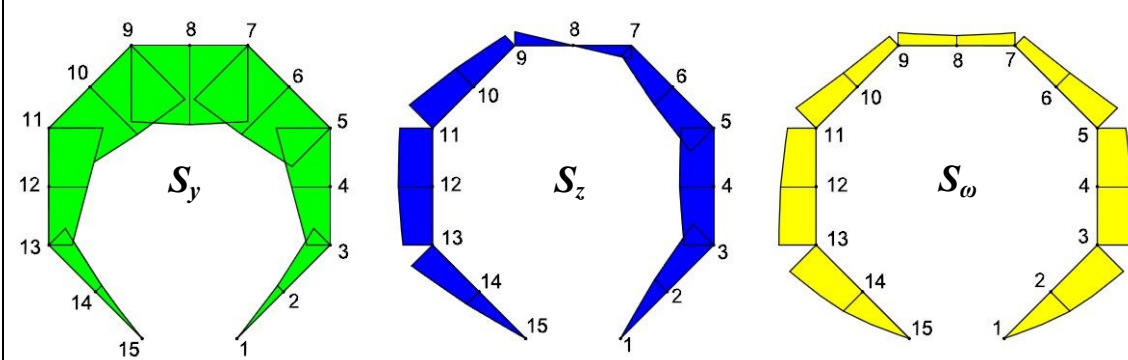
$$S_y = \int_A z dA = \int z t ds, \quad (4.13)$$

$$S_z = \int_A y dA = \int y t ds, \quad (4.14)$$

$$S_{\omega} = \int_A \omega_V dA = \int \omega_V t ds. \quad (4.15)$$

Taulukkoon 4.4 on laskettu osapoikkipintojen staattiset momentit ja sektoriaaliset staattiset momentit käyttämällä kaavoissa (4.13), (4.14) ja (4.15) taulukoiden 4.1, 4.2 ja 4.3 arvoja.

Taulukko 4.4. Osapoikkipintojen staattiset momentit ja sektoriaaliset staattiset momentit.



Laskentapiste i	$S_{y,i} [\text{mm}^3]$	$S_{z,i} [\text{mm}^3]$	$S_{\omega,i} [\text{mm}^4]$
1	0	0	0
2	-2731,6	-5503,9	$4,257 \times 10^5$
3	-7267,7	-9203,3	$5,817 \times 10^5$
4	-12085,7	-10684,9	$5,565 \times 10^5$
5	-16903,7	-10173,6	$4,434 \times 10^5$
6	-21015,4	-7959,5	$3,041 \times 10^5$
7	-23714,6	-4332,9	$2,002 \times 10^5$
8	-24711,0	0	$1,571 \times 10^5$
9	-23714,6	4332,9	$2,002 \times 10^5$
10	-21015,4	7959,5	$3,041 \times 10^5$
11	-16903,7	10173,6	$4,434 \times 10^5$
12	-12085,7	10684,9	$5,565 \times 10^5$
13	-7267,7	9203,3	$5,817 \times 10^5$
14	-2731,6	5503,9	$4,257 \times 10^5$
15	0	0	0

Vääntöjäyhyysmomentti

Ohutseinämäisen teräsavoprofiilin vääntöjäyhyysmomentti I_t voidaan laskea kaavalla (Vlasov 1961, s. 30):

$$I_t = \frac{\alpha}{3} \int_A t^3 dA = \frac{\alpha}{3} \int t^3 ds, \quad (4.16)$$

missä α on poikkileikkauksen muodosta riippuva kokeellinen kerroin. C-paalun poikkileikkauksen tapauksessa voidaan käyttää kerrointa $\alpha = 1$ (Vlasov 1961, s. 93). Käyttämällä taulukon 4.2 arvoja saadaan kaavan (4.16) mukaan poikkileikkauksen vääntöjäyhyysmomentin arvoksi:

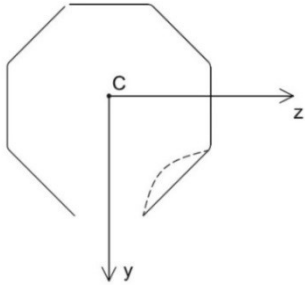
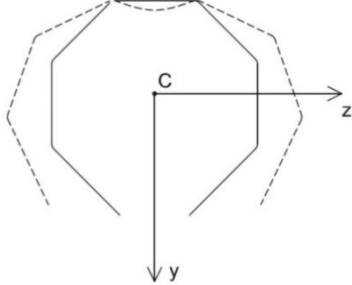
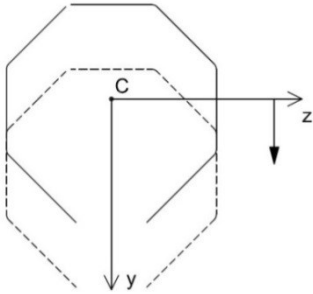
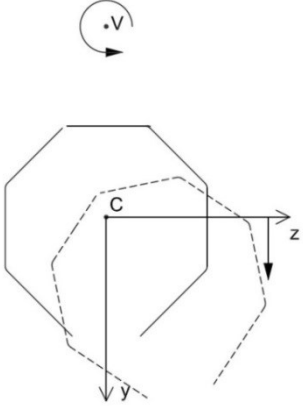
$$I_t = 19072,8 \text{ mm}^4.$$

4.2 Puristettu poikkileikkaus

4.2.1 Murtomekanismit

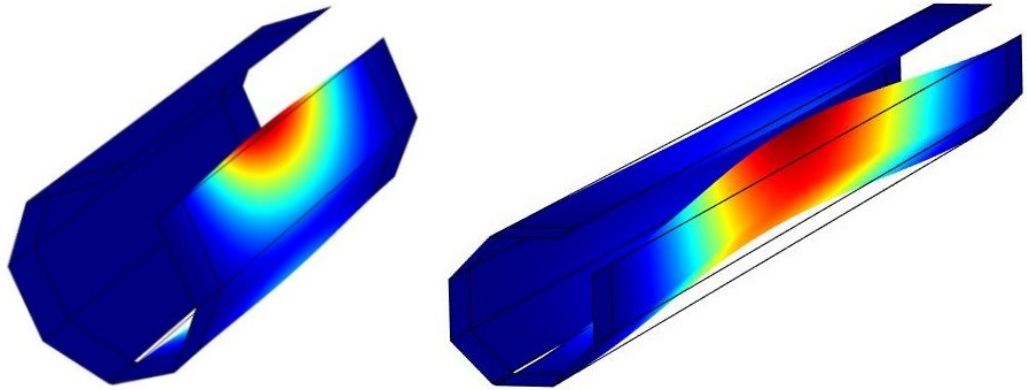
Keskeisesti puristetun poikkileikkaukseltaan avoimen ohutseinämäisen sauvan kestävyys määritetään laskemalla kriittinen puristava voima, jolla poikkileikkaus myötää tai menettää stabiiliutensa. Stabiiliuden menettäminen on mahdollista myötörajaa alemmilla jännityksen arvoilla johtuen poikkileikkauksen avonaisuudesta, hoikkuudesta sekä hoikista taso-osista. Nurjahdusmuodot voidaan jakaa paikallisiin ns. lokaaleihin ja globaaleihin ilmiöihin. Lokaaleihin nurjahdusmuotoihin kuuluvat poikkileikkauksen paikallinen lommahdus ja vääristymisnurjahdus, kun taas globaaleja nurjahdustapauksia ovat tasonurjahdus, vääntönurjahdus sekä taivutusvääntönurjahdus. Taulukossa 4.5 on havainnollistettu eri nurjahdusmuodot C-paalun tapauksessa. Vääntönurjahdusta ei ole esitetty taulukossa 4.5, sillä se voi tapahtua ainoastaan, kun poikkileikkauksen painopiste ja vääntökeskiö sijaitsevat samassa pisteessä. Vääntönurjahduksessa poikkileikkaus säilyttää muotonsa, mutta kiertyy painopisteen/vääntökeskiön ympäri.

Taulukko 4.5. C-paalun poikkileikkauksen lokaalit ja globaalit nurjahdusmuodot.

Lokaalit nurjahdusmuodot	
 <p>Paikallinen lommahdus</p>	 <p>Vääristymisnurjahdus</p>
Globaalit nurjahdusmuodot	
<p>• V</p>  <p>Tasonurjahdus</p>	 <p>Taivutusvääntönurjahdus</p>

Paikallinen lommahdus

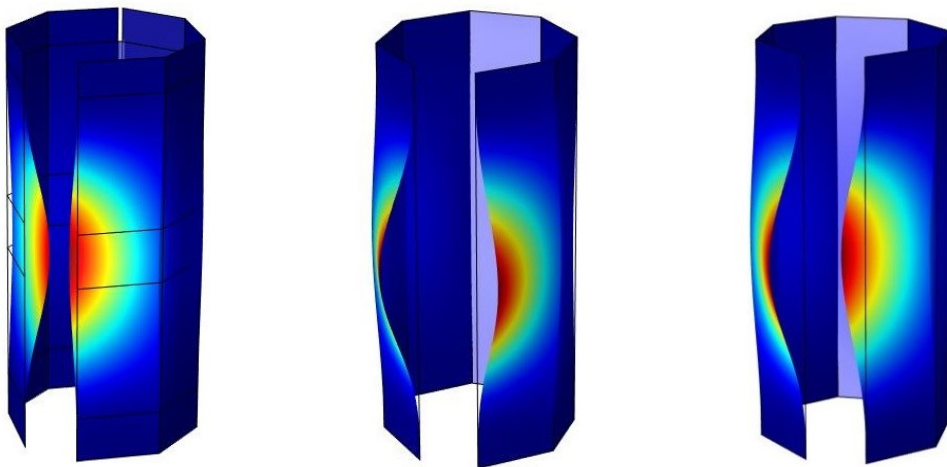
Paikallisessa lommahduksessa yksittäinen tason osa menettää stabiiliutensa hoikkuutensa tai riittämättömän tuennan takia. C-paalun tapauksessa paikallinen stabiiliuden menettäminen on mahdollista yksittäisen sivun lommahtaessa tai katkohitsin välin ollessa pitkä, jolloin kahdesta levyosasta toinen menettää stabiiliutensa tasonurjahduksessa. Yhden sivun paikallisen lommahduksen ja levytason tasonurjahduksen muodot on esitetty kuvassa 4.3.



Kuva 4.3. C-paalun yksittäisen tason paikallinen lommahdus ja levyosan tasonurjahdus.

Vääristymisnurjahdus

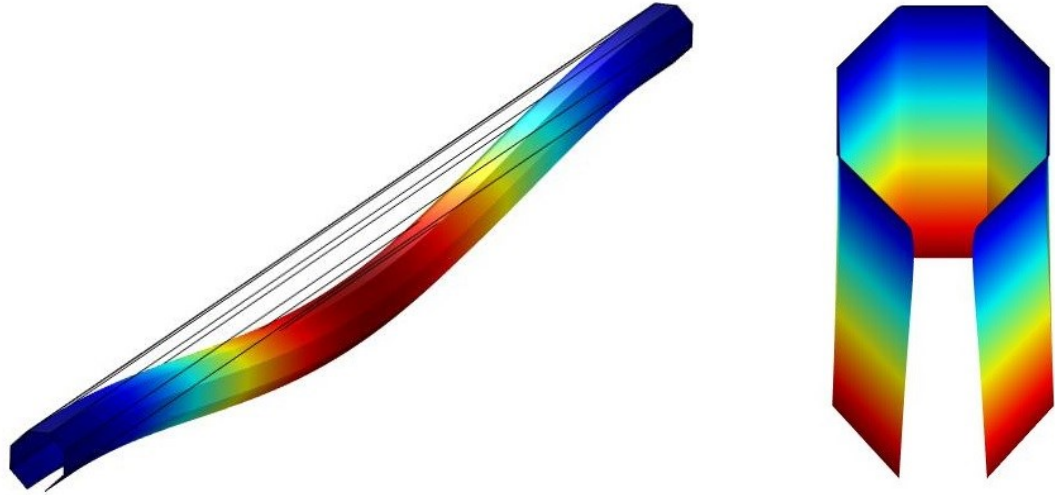
Vääristymisnurjahdus on paikallisen lommahduksen kaltainen ilmiö, eikä niiden erottaminen toisistaan ole aina selkeää kuten kuvia 4.3 ja 4.4 vertaamalla nähdään. Kuvassa 4.4 C-paalun molemmat hahlojen viereiset sivut ovat lommahtaneet kuvassa 4.3 esitetyn yksittäisen tason paikallisen lommahduksen sijaan. Vääristymisnurjahduksessa avoprofiilin taso-osat kiertyvät toisen tasomaisen osan suhteen. C-paalun tapauksessa vääristymisnurjahdus ilmenee kuvan 4.4 mukaisesti hahlon sulkeutumisena tai aukeamisena.



Kuva 4.4. C-paalun vääristymisnurjahdustapauksia.

Tasonurjahdus

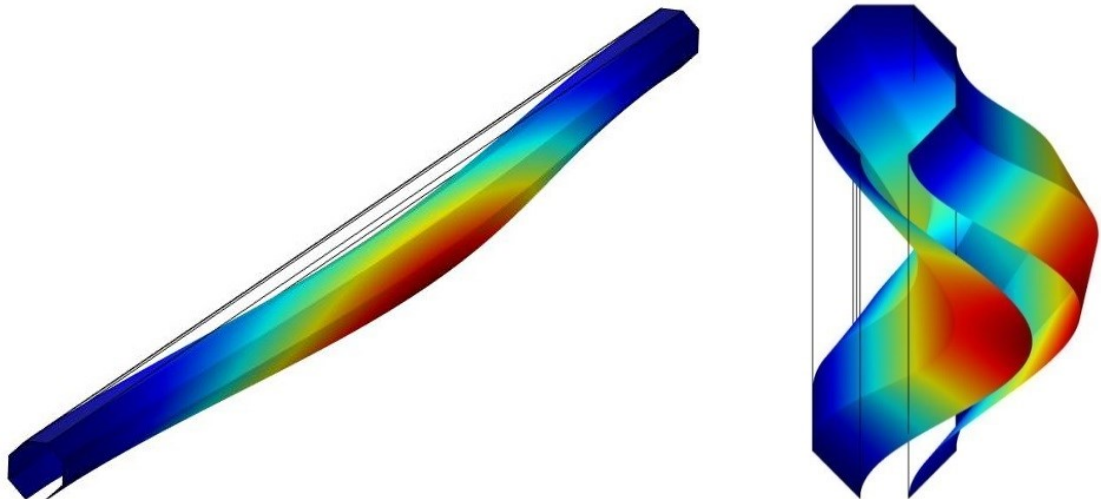
Tasonurjahduksessa poikkileikkaus toimii kokonaisuutena ja menettää stabiiliutensa taipumalla paalun pituussuuntaisen akselin ja poikkileikkauksen toisen pääjäyhyysakselin tasossa. Kuvassa 4.5 on havainnollistettu C-paalun tasonurjahdus hahlon eli poikkileikkauksen y-akselin suuntaan.



Kuva 4.5. C-paalun tasonurjahdus hahlon eli y-akselin suuntaan.

Taivutusvääntönurjahdus

Taivutusvääntönurjahduksessa poikkileikkaus menettää stabiiliutensa taipumalla, kuten tasonurjahduksen tapauksessa, pääjäyhyysakselinsa suuntaan, mutta samalla kiertyen vääntökeskiön ympäri taulukossa 4.5 esitetyn kuvan mukaisesti. C-paalun taivutusvääntönurjahduksen muoto on esitetty kuvassa 4.6.

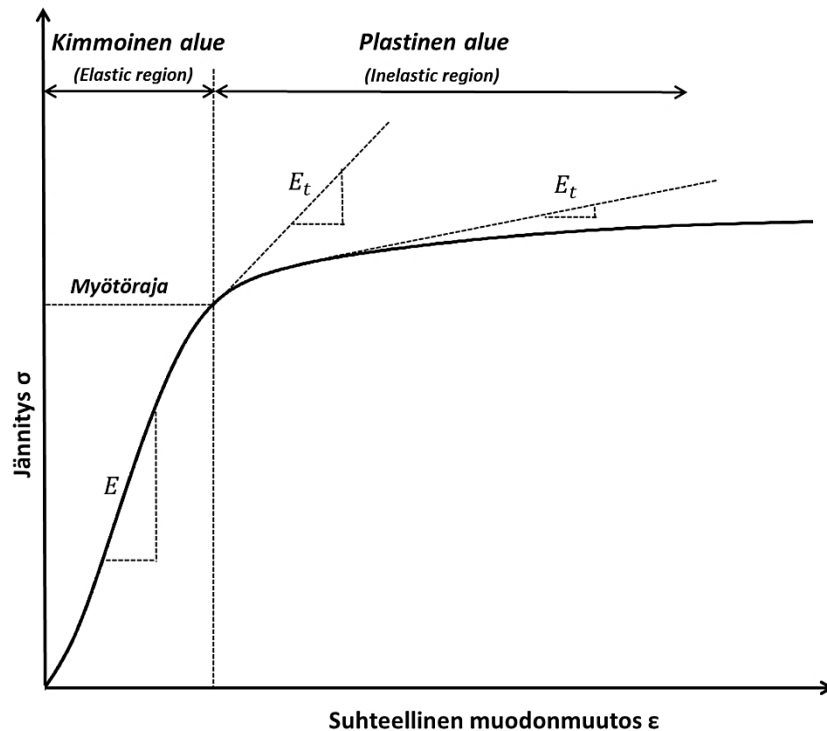


Kuva 4.6. C-paalun taivutusvääntönurjahduksen muoto.

4.2.2 Puristuskestävyyden määrittäminen

Myötökuorman määrittäminen

C-paalun puristuskestävyyden $N_{c,p}$ määrittämiseksi lasketaan aluksi kimmoteorian mukainen myötökuorman arvo $N_{c,y}$ eli puristusvoima, jolla paalun poikkileikkauksen jännitys saavuttaa myötörajan f_y . Kuvassa 4.7 on esitetty rakenneteräkselle tyypillinen jännitys-venymäkuvaaja, joka on jaettu kimmoiseen ja plastiseen alueeseen. Jännitys-venymäkuvaajan pystyakselilla oleva jännitys on laskettu jakamalla puristusjännitys poikkileikkauksen alkutilan pinta-alalla. Alueiden raja kulkee kohdassa, jossa poikkileikkauksen jännitys saavuttaa myötörajan.



Kuva 4.7. Materiaalin jännitys-muodonmuutoskuvaaja.

Myötörajaa pienemmillä jännityksen arvoilla poikkileikkaus toimii lähes kimmoisasti ja materiaalin kimmomoduulin E otaksutaan olevan vakio. Tällöin kuormituksesta aiheutuvien muodonmuutosten oletetaan palautuvan jännitystilän poistuessa. Myötörajaa ylemmillä jännityksillä poikkileikkaus alkaa plastisoitua ja kuormituksesta aiheutuvat muodonmuutokset jäävät pysyviksi. Plastisella alueella kimmomoduuli E ei enää ole vakio vaan materiaalille on määritettävissä jännityksestä riippuva epälineaarinen tangenttimoduuli E_t .

Stabiiliuden menettämistä myötörajaa ylemmällä arvolla kutsutaan plastiseksi nurjahdukseksi. Plastiselle nurjahtamiselle käytetään myös termiä kimmoton nurjahtaminen (engl. *inelastic buckling*). Paaluille plastisten nurjahduskuormien laskeminen ei ole olennaista, sillä käytännössä C-paalulle sallittava puristuskuorman arvo ei saa ylittää myötökuorman arvoa. C-paalun puristuskestävyyden määrittämisessä riittää, että lasketaan myötökuorman $N_{c,y}$ arvo ja tutkitaan tapahtuuko poikkileikkauksessa stabiiliuden

menettämistä myötökuormaa pienemmillä kuormilla (engl. *elastic buckling*). Myötökuorma voidaan laskea kaavalla:

$$N_{c,y} = A f_y, \quad (4.17)$$

missä A on poikkileikkauksen nettopinta-ala. Nettopinta-alaa laskettaessa on huomioitava mahdolliset reiät poikkileikkauksessa sekä paalun kärjen viisteet. Käyttämällä C-paalun myötörajan f_y arvona 355 MPa saadaan kaavan (4.17) ja taulukon 2.1 nettopinta-alojen perusteella C-paalun myötökuorman ominaisarvoksi paalun eri kohdissa arvot:

katkohitsin kohdalla	$N_{c,y.p.w} = A_{p.w.0} f_y = 564,2 \text{ kN},$
katkohitsien välissä	$N_{c,y.p.0} = A_{p.0} f_y = 557,2 \text{ kN},$
alapaalun reiän kohdalla	$N_{c,y.p.r} = A_{p.r.0} f_y = 493,3 \text{ kN},$
kärjen kohdalla	$N_{c,y.p.k} = A_{p.k.0} f_y = 519,7 \text{ kN}.$

Poikkileikkauksen myötörajan ollessa vakio koko paalun pituuden osalta määräytyy sen myötökuorman ominaisarvo pienimmän nettopinta-alan mukaan. Tässä tapauksessa pienin nettopinta-ala on C-paalun kärjen reiän kohdalla.

Globaalit kimmoiset nurjahduskuormat Vlasovin teorian avulla

Myötökuorman määrittämisen jälkeen lasketaan keskeisesti puristetun C-paalun globaalit kimmoiset nurjahduskuormat eri nurjahduspituuksille käyttämällä Vlasovin taivutusvääntönurjahdusteoriaa ja olettamalla, että kahden levyosan väli on umpeen hitsattu. Vlasov olettaa, että poikkileikkaus säilyttää muotonsa koko pituusakselinsa matkalla, jolloin leikkausmuodonmuutosta ei tapahdu (Vlasov 1961, s. 7). Näin ollen Vlasovin teoriolla lasketut nurjahduskuormat ovat suurempia kuin FEM-menetelmällä lasketut ja todelliset nurjahduskuormat, mutta ne kuvaavat kuitenkin hyvin nurjahduskuorman suuruusluokkaa ja antavat vertailuarvon.

Keskeisesti puristetun C-paalun globaali nurjahduskuorma P_{cr} saadaan laskettua yhtälöstä:

$$\begin{vmatrix} P_w - P & 0 & -y_V P \\ 0 & P_v - P & z_V P \\ -y_V P & z_V P & r^2(P_\phi - P) \end{vmatrix} = 0, \quad (4.18)$$

missä P_v , P_w ja P_ϕ ovat puhtaiden nurjahdustapausten kriittisiä kuormia ja y_V sekä z_V ovat vääntökeskiön koordinaatit painopistekoordinaatistossa (Vlasov 1961, s. 274). Puhtaiden tasonurjahdustapausten kriittiset kuormat P_v ja P_w lasketaan Eulerin tasonurjahduskaavoista (4.19) ja (4.20) ja puhtaan vääntönurjahduksen kriittinen kuorma P_ϕ lasketaan kaavasta (4.21):

$$P_v = \frac{\pi^2 E I_z}{L_v^2}, \quad (4.19)$$

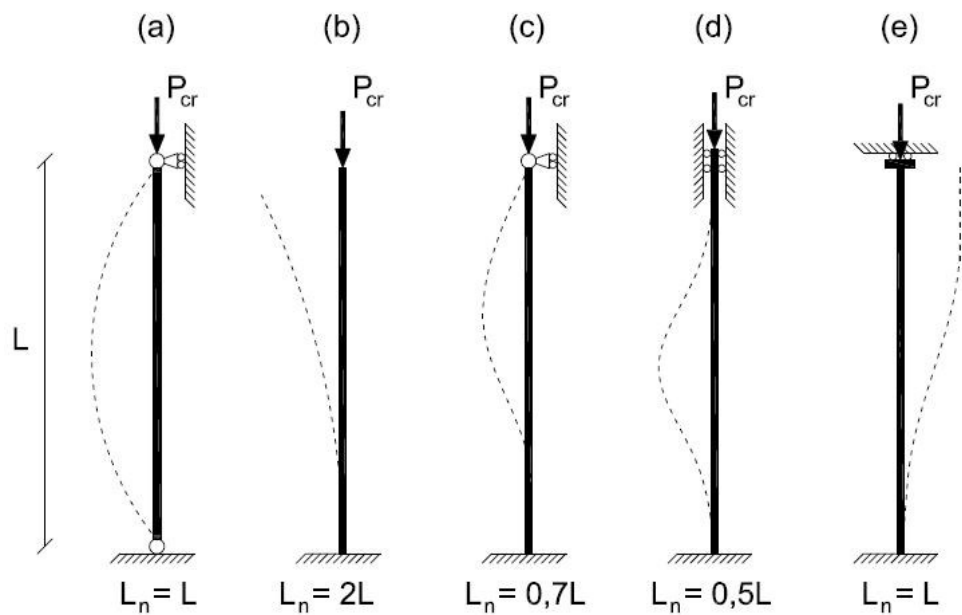
$$P_w = \frac{\pi^2 E I_y}{L_w^2}, \quad (4.20)$$

$$P_\varphi = \frac{1}{r^2} \left(\frac{\pi^2 E I_\omega}{L_\varphi^2} + G I_t \right), \quad (4.21)$$

missä

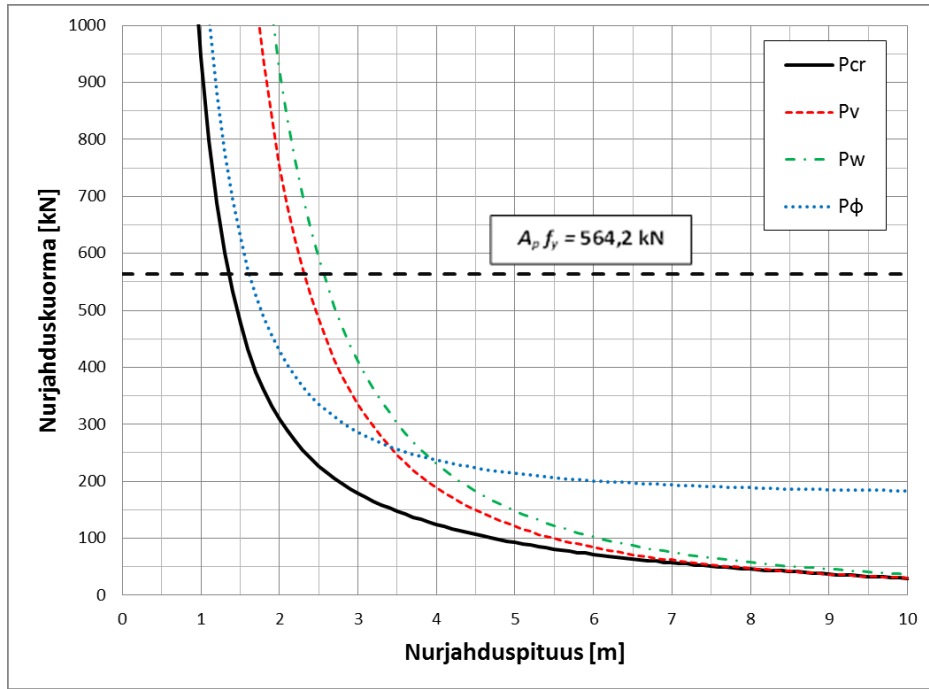
$$r^2 = \frac{I_y + I_z}{A} + y_V^2 + z_V^2$$

ja L_v , L_w sekä L_φ kuvan 4.8 mukaisia tuentatavasta riippuvia nurjahduspituuksia.



Kuva 4.8. Perusnurjahdustapaukset ja nurjahduspituudet (SFS EN 1992-1-1, s. 65).

Käyttämällä kohdassa 4.1 laskettuja C-paalun poikkileikkaussuureita ja käyttämällä samaa nurjahduspituutta ($L_v = L_w = L_\varphi = L_n$) saadaan yhtälöstä (4.18) nurjahduspituudella L_n kolme ratkaisua P_1 , P_2 ja P_3 , joista pienin on määräävä nurjahduskuorma P_{cr} . Kuvassa 4.9 on esitetty C-paalun nurjahduskuormat eri nurjahduspituuksilla sekä piirretty myötöraja $f_y = 355$ MPa vastaava puristuskuorman arvo 564,2 kN pinta-alalla $A_p = 1589,4$ mm².



Kuva 4.9. Vlasovin teorian mukaiset nurjahduskuormat eri nurjahduspituuksilla.

Kuvasta 4.9 voidaan havaita, että ominaisarvotehtävän pienintä ratkaisua vastaava nurjahduskuorman P_{cr} nurjahdustapaus on taivutusvääntönurjahdus nurjahduspituuden ollessa $0 < L_n < 8,3$ m. Vlasovin teorian mukaista nurjahduskuormaa P_{cr} vastaava nurjahdustyyppi vaihtuu tasonurjahdukseen P_v nurjahduspituuden ylittäessä arvon 8,3 metriä. Nurjahduskuorma P_{cr} saavuttaa kuvaan 4.9 piirretyn myötökuorman arvon 564,2 kN nurjahduspituuden ollessa 1350 mm. Kuvan 4.9 perusteella voidaan arvioida, että C-paalun puristuskestävyyden arvo määräytyy nurjahduspituuden mukaan seuraavasti:

Nurjahduspituus L_n

$0 \text{ mm} \leq L_n \leq 1350 \text{ mm}$

$1350 \text{ mm} < L_n \leq 8300 \text{ mm}$

$L_n > 8300 \text{ mm}$

Puristuskestävyyden arvo $N_{c,p}$

Myötökuorman mukaan $N_{c,p} = N_{c,y}$

Taivutusvääntönurjahduskuorman mukaan $N_{c,p} = P_{cr}$

Tasonurjahduskuorman mukaan $N_{c,p} = P_{cr} = P_v$

Katkohitsin vaikutus globaaliin nurjahduskestävyyteen

C-paalun poikkileikkauksen kahden levyosan välisen pituussuuntaisen katkohitsin vaikutusta nurjahduskestävyyteen on vaikea laskea käsin. Katkohitsien välisen etäisyyden vaikutusta C-paalun globaaliin nurjahduskuormaan tutkitaan FEM-menetelmän avulla käyttämällä tietokoneohjelmaa COMSOL Multiphysics 4.3b. COMSOL -ohjelmassa on lineaarisen nurjahduksen analysointiin tarkoitettu laskentatyökalu (*Linear Buckling*), jonka avulla voidaan määrittää kappaleelle eri nurjahdusmuotoja vastaavat kriittiset kuormat. C-paalu mallinnetaan COMSOL -ohjelmalla käyttäen kuorielementtejä, jolloin Vlasovin oletuksesta poiketen, poikkileikkauksen leikkausmuodonmuutoksia ei ole rajoitettu.

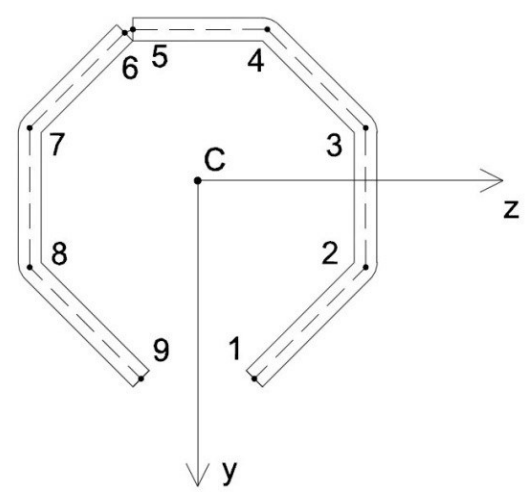
Katkohitsin vaikutusta globaaliin nurjahduskestävyyteen tutkitaan eri nurjahduspituuksilla L_n ja katkohitsien välisillä etäisyyksillä e_w katkohitsin pituuden ollessa vakio $l_w =$

40 mm. Aluksi lasketaan C-paulun nurjahduskestävyys eri katkohaitsien välisillä etäisyyksillä $0 \leq e_w \leq 460$ mm nurjahduspituuksilla $L_n = (1; 1,5; 2; 3; 4; 6)$ m. Tämän jälkeen määritetään hitsiväli, jolla saavutetaan 99 % umpeen hitsatun ($e_w = 0$) poikkileikkauksen nurjahduskestävyydestä.

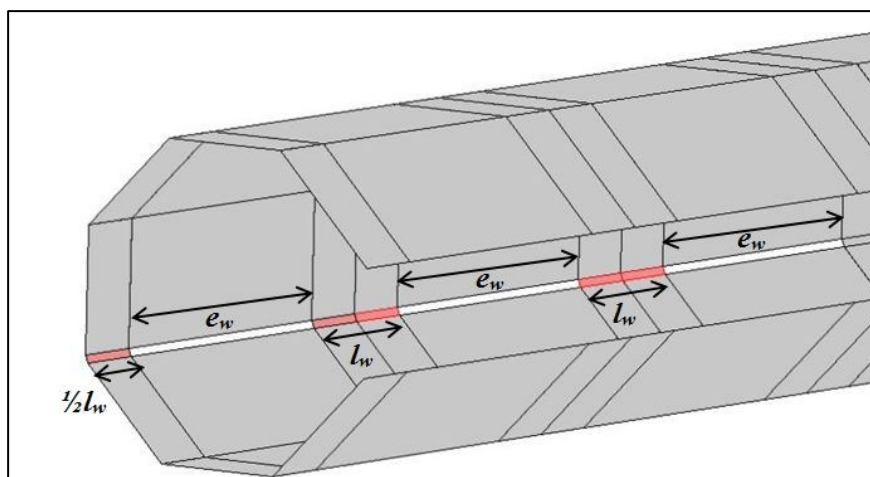
Laskentamalli

FEM-laskelmissa käytetyn poikkileikkauksen geometria on taulukon 4.6 mukainen.

Taulukko 4.6. Nurkkapisteiden sijainnit painopistekoordinaatistossa FEM-laskennassa.

Piste i	y_i [mm]	z_i [mm]	
1	51,8	14,8	
2	22,6	44,0	
3	-13,8	44,0	
4	-39,6	18,2	
5	-39,6	-17,0	
6	-38,7	-19,1	
7	-13,8	-44,0	
8	22,6	-44,0	
9	51,8	-14,8	

Taulukon 4.6 mukaiset nurkkapistteet eroavat aiemmin käsinlaskennassa käytetystä geometriasta (taulukko 4.1) ainoastaan katkohaitsin osalta. Kuorimalli on rakennettu COMSOL-ohjelmassa kuvan 4.10 mukaisesti siten, että levyosat on kiinnitetty laskenta-elementeillä taulukon 4.6 mukaisten pisteiden 5 ja 6 väliltä katkohaitsin pituudelta l_w . Paalun alkupäässä ($x = 0$) on puolikas katkohaitsi l_w , jota seuraa hitsaamaton väli e_w ja puolikas katkohaitsi. Tätä kolmesta osasta koostuvaa elementtiä on kopioitu kunnes paalun pituus L saavutetaan. Tällöin paalun loppupäässä ($x = L$) on myös puolikas katkohaitsi.



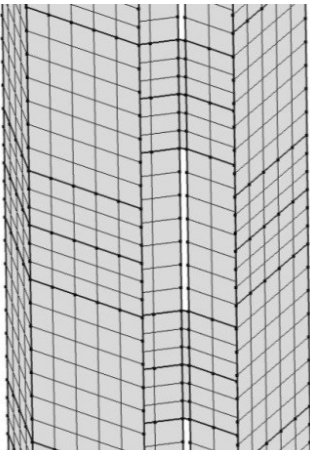
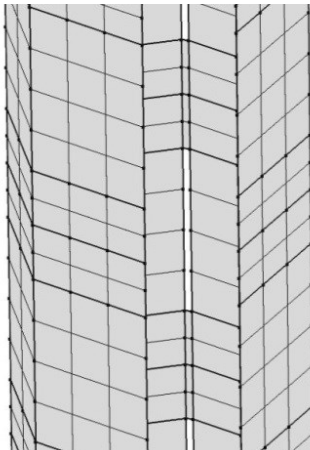
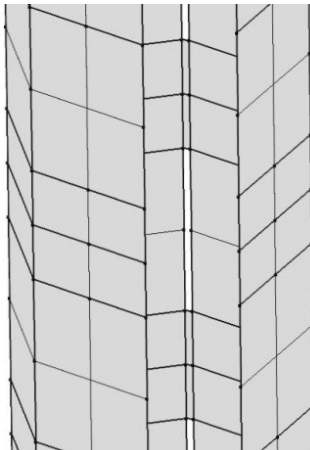
Kuva 4.10. C-paalun kuorielementtimalli COMSOL-ohjelmassa.

Koska kuorimallille on vaikea mallintaa kuvan 4.8 tuentatapaa (a), on päädytty tukemaan C-paalu molemmista päistään jäykästi tuentatavan (d) mukaisesti. Tällöin C-paalun ala- ($x = 0$) ja yläpään ($x = L$) kaikki reunaehdot ovat siirtymän ja kiertymän suhteen estettyjä lukuun ottamatta yläpään pituussuuntaista siirtymää. Tuentatavan perusteella mallinnetun paalun pituus L on kaksinkertainen paalun nurjahduspituuteen L_n verrattuna.

C-paaluun kohdistuva puristusvoima on annettu viivakuormana paalun yläpäähän ($x = L$). Poikkileikkauksen seinämäpaksuutena on käytetty arvoa $t = 6$ mm ja kimmokertoimenä $E = 210$ GPa. Katkohitsin vaikutuksen tutkimisessa on elementtiverkkona käytetty suorakulmion muotoisia elementtejä, joiden sivunpituus on rajattu maksimipituuteen tutkittavan paalun pituudesta riippuen taulukon 4.7 mukaisesti.

Taulukko 4.7. Katkohitsin tutkimisessa käytetyt elementtiverkot.

Kappaleen pituus L (nurjahduspituus L_n) [mm]	Elementin sivun maksimipituus [mm]
2000 (1000)	1) $36,5/4 = 9,125$
3000 (1500), 4000 (2000), 6000 (3000), 8000 (4000)	2) $36,5/2 = 18,25$
12000 (6000)	3) $36,5$ (\approx lyhimmän taso-osan leveys)

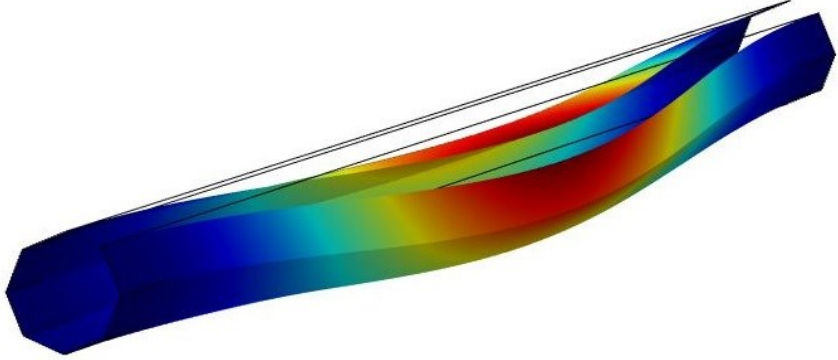




1)
2)
3)

Ehjä paalun ($e_w = 0$) lineaarinen nurjahduskestävyys

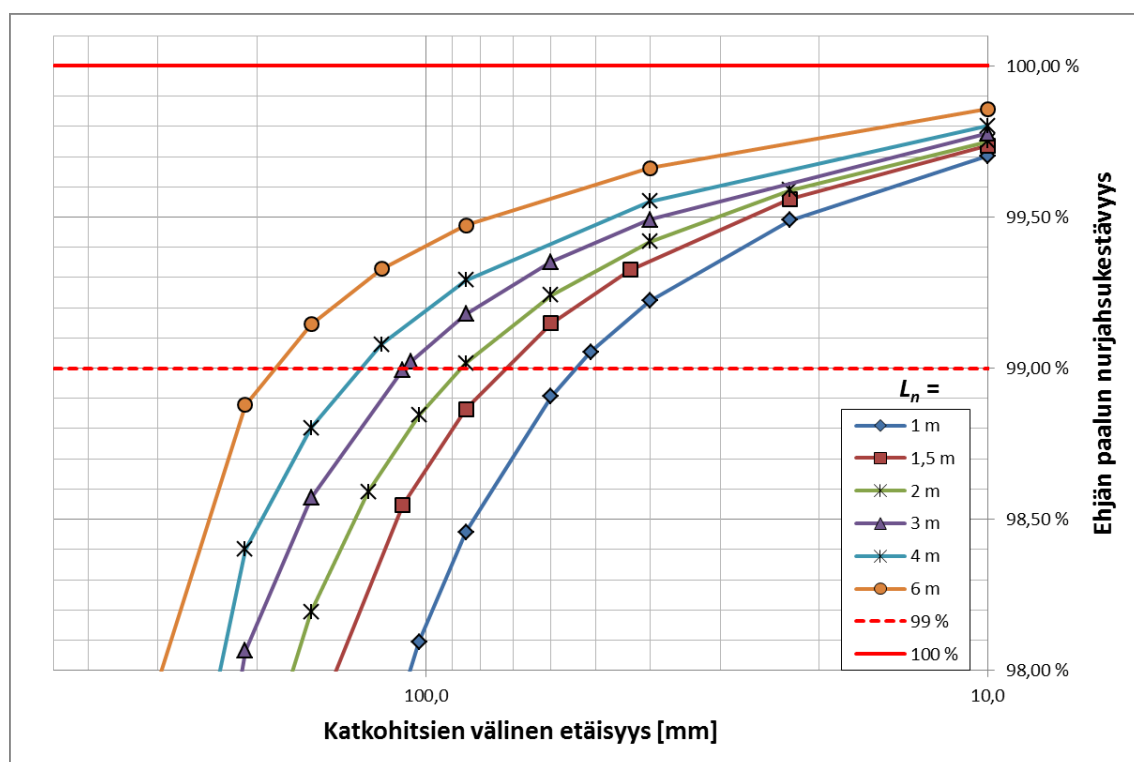
Umpeen hitsatun C-paalun lineaariseksi nurjahduskestävyydeksi saatiin COMSOL -ohjelmalla taulukon 4.8 mukaiset vertailuarvot eri katkohaitsivälejä varten.

Taulukko 4.8. Ehjän paalun lineaarinen nurjahduskestävyys COMSOL –ohjelmalla.

L_n [mm]	P_{cr} [kN]	Nurjahdustyyppi
1000	920,9	 <p>Kaikissa laskentatapauksissa tapahtui taivutusväöntönurjahdus</p>
1500	467,0	
2000	301,3	
3000	173,9	
4000	120,7	
6000	70,9	

Katkohaitsattujen C-paalujen nurjahduskestävyys hitsiväleillä $0 < e_w \leq 460$ mm

Ehjän C-paalun nurjahduskestävyyden määrittämisen jälkeen laskettiin katkohaitsatun C-paalun lineaarinen nurjahduskestävyys eri hitsiväleillä $0 < e_w \leq 460$ mm. Tarkoituksena oli määrittää eri nurjahduspituuksille hitsien välinen minimietäisyys $e_{w,min}$, jolla saavutetaan 99 % ehjän paalun nurjahduskestävyydestä. Tulokset on esitetty kuvassa 4.11.



Kuva 4.11. Katkohaitsien välisen etäisyyden e_w vaikutus nurjahduskestävyyteen.

Tuloksista voidaan havaita, että katkohitsien välisellä etäisyydellä on sitä pienempi merkitys mitä pidempi on C-paalun nurjahduspituus. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että hitsaamalla C-paalun levyosat yhteen 40 mm katkohitsillä vähintään 60 mm välein saavutetaan vähintään 99 % ehjän paalun nurjahduskestävyydestä, kun nurjahduspituus $L_n > 1000$ mm. Nurjahduspituuden ollessa alle 1000 mm, pitäisi käyttää tiheämpää katkohitsiä, jotta saavutettaisiin 99 % ehjän paalun nurjahduskestävyydestä. Käytännössä 60 mm tiheämpää hitsiväliä ei kuitenkaan tarvitse käyttää, sillä aiemmin osoitettiin Vlasovin teorialla, että nurjahduspituuden ollessa alle 1350 mm, saavutetaan C-paalun myötöraja ennen lineaarista nurjahtamista.

Käyttämällä C-paalun katkohitsin pituutena $l_w = 40$ mm ja hitsien välisenä etäisyytenä $e_w = 60$ mm laskettiin COMSOL –ohjelmalla eri nurjahduspituuksia $0 < L_n \leq 10$ m vastaavat nurjahduskestävyydet ja niitä vastaavat nurjahdustyyppit. Tulokseksi saatiin taulukon 4.9 mukaiset nurjahduskestävyydet ja -tyypit, jossa merkintä 40(60) tarkoittaa katkohitsiä, jonka katkohitsin pituus on 40 mm ja hitsien välinen etäisyys 60 mm.

Taulukko 4.9. Katkohitsillä 40(60) hitsatun ja umpeen hitsatun ($e_w = 0$) C-paalun lineaarinen nurjahduskestävyys COMSOL –ohjelmalla.

L_n [mm]	$P_{cr.FEM.40(60)}$ [kN]	$P_{cr.FEM.e_w=0}$ [kN]	$\frac{P_{cr.FEM.40(60)}}{P_{cr.FEM.e_w=0}}$	Nurjahdustyyppi (FEM)
600	2231,7	2275,0	98,1 %	Taivutusvääntönurjahdus
800	1349,1	1367,2	98,7 %	Taivutusvääntönurjahdus
1000	910,9	920,9	98,9 %	Taivutusvääntönurjahdus
1200	668,0	674,4	99,0 %	Taivutusvääntönurjahdus
1500	463,0	467,0	99,1 %	Taivutusvääntönurjahdus
2000	299,0	301,3	99,2 %	Taivutusvääntönurjahdus
3000	172,7	173,9	99,3 %	Taivutusvääntönurjahdus
4000	120,0	120,7	99,5 %	Taivutusvääntönurjahdus
6000	70,5	70,9	99,5 %	Taivutusvääntönurjahdus
8000	45,6	45,8	99,6 %	Taivutusvääntönurjahdus
9000	36,9	37,3	99,0 %	Tasonurjahdus
10000	29,9	30,2	99,0 %	Tasonurjahdus

Taulukossa 4.9 esitetyistä tuloksista nähdään, että katkohitsiä 40(60) käyttämällä saavutetaan 99 % umpeen hitsatun C-paalun nurjahduskestävyydestä myös nurjahdustyyppin vaihtuessa taivutusvääntönurjahduksesta tasonurjahdukseen.

C-paalun puristuskestävyys

C-paalun laskennallinen puristuskestävyyden ominaisarvo $N_{c,p}$ voidaan määrittää piirtämällä samaan kuvaajaan vakiona pysyvä alin myötökuorman arvo sekä lineaarisen nurjahduskestävyyden kuvaaja. Nurjahduskestävyyden ominaisarvo määräytyy myötökuorman perusteella niillä nurjahduspituuksilla, joilla lineaarinen nurjahduskuorma on myötökuormaa suurempi (plastinen alue). Sen sijaan nurjahduskestävyyden ominaisarvona käytetään lineaarista nurjahduskuormaa alueella, jossa lineaarinen nurjahdus tapahtuu myötökuormaa alemmalla puristuskuormalla (kimmoinen alue).

Taulukossa 4.10 on katkohitsillä 40(60) hitsatun C-paalun lineaarisen nurjahduskestävyyden tulokset, jotka on laskettu COMSOL –ohjelmalla. Taulukossa on verrattu FEM-menetelmällä saatuja globaaleja nurjahduskuormia Vlasovin teorialla laskettuihin arvoihin.

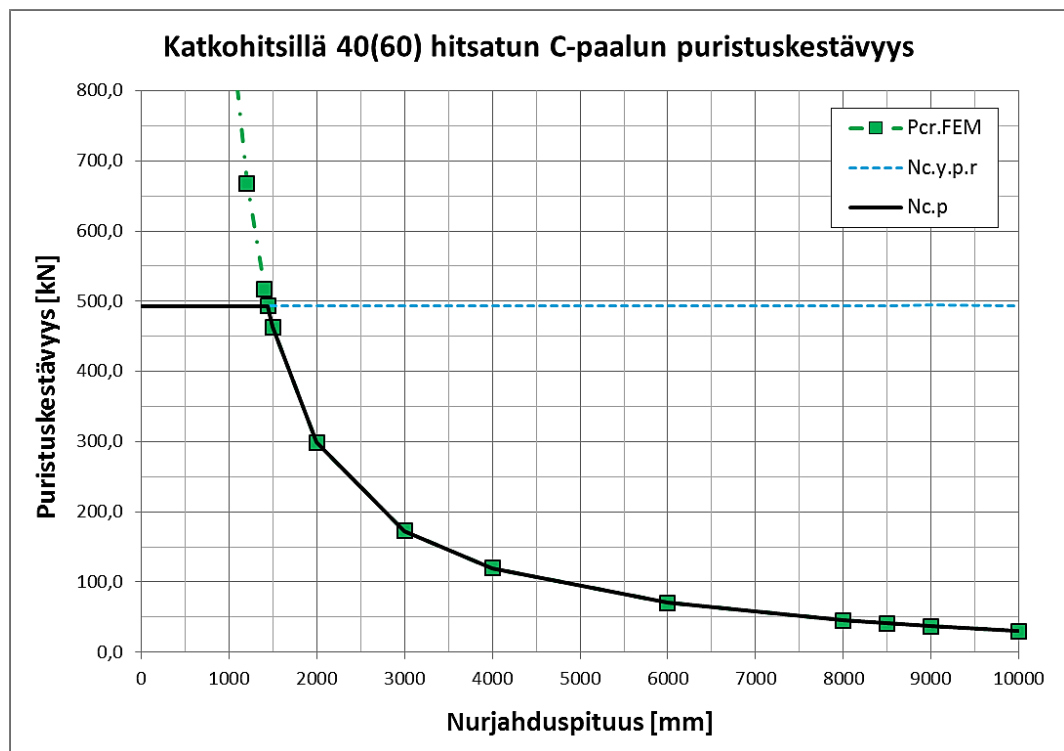
Taulukko 4.10. Katkohitsillä 40(60) hitsatun sekä Vlasovin teorian mukainen C-paalun lineaarinen nurjahduskestävyys.

L_n [mm]	$P_{cr.FEM}$ [kN]	$P_{cr.Vlasov}$ [kN]	$\frac{P_{cr.FEM}}{P_{cr.Vlasov}}$	Nurjahdustyyppi (FEM) (L) = lokaali (G) = globaali
50	7119,5	333615,9	-	(L) Paikallinen lommahdus
100	4771,6	83489,5	-	(L) Vääristymisnurjahdus
500	2614,2	3448,1	-	(L) Vääristymisnurjahdus
600	2231,7	2428,7	91,9 %	(G) Taivutusvääntönurjahdus
1000	910,9	944,1	96,5 %	(G) Taivutusvääntönurjahdus
1400	517,4	532,3	97,2 %	(G) Taivutusvääntönurjahdus
1500	463,0	476,4	97,2 %	(G) Taivutusvääntönurjahdus
2000	299,0	308,6	96,9 %	(G) Taivutusvääntönurjahdus
3000	172,7	179,2	96,4 %	(G) Taivutusvääntönurjahdus
4000	120,0	124,4	96,5 %	(G) Taivutusvääntönurjahdus
6000	70,5	71,8	98,2 %	(G) Taivutusvääntönurjahdus
8000	45,6	46,2	98,7 %	(G) Taivutusvääntönurjahdus
8500	41,2	41,8	98,6 %	(G) Taivutusvääntönurjahdus
9000	36,9	37,3	99,0 %	(G) Tasonurjahdus
10000	29,9	30,2	99,0 %	(G) Tasonurjahdus

Taulukossa 4.10 esitetyistä tuloksista nähdään, että Vlasovin teorialla lasketut globaalit nurjahduskuormien arvot ovat suurempia kuin FEM-menetelmällä lasketut arvot. Nurjahduspituuden ollessa yli 1000 mm saadaan Vlasovin teorialla, ilman katkohitsin vaikutusta, 1,0 – 3,8 % suurempia arvoja suhteessa FEM-menetelmällä laskettuihin nurjahduskestävyyden arvoihin, joissa katkohitsi huomioitiin. Mikäli C-paalun levyosat hitsataan toisiinsa umpinaisella hitsillä, saadaan Vlasovin teorialla vieläkin tarkempia arvoja suhteessa FEM-menetelmällä laskettuihin arvoihin. FEM-menetelmällä ja Vlasovin teorialla saatujen tulosten ollessa lähellä toisiaan osoittaa, että Vlasovin oletus poikkileikkauksen muodon säilymisestä sen pituusakselin matkalla toteutuu riittävällä tarkkuudella nurjahduspituuden ollessa yli 1000 mm.

Taulukon 4.10 myötökuormaa suurempia lineaarisen nurjahduskuorman arvoja ei voida käytännössä saavuttaa. COMSOL –ohjelma käyttää laskelmissa lineaarista materiaali-mallia, jolloin kappaleen myötörajaa ei huomioida ja kimmomoduuli E pysyy vakiona. Myötökuormaa suuremmilla puristuskuormilla saavutetut nurjahdusmuodot vastaavat kuitenkin kimmottomalla alueella tapahtuvia nurjahdusmuotoja. Kimmottomat nurjahdusmuodot ovat samanlaisia kuin kuvissa 4.3 ja 4.4 esitetyt nurjahdusmuodot.

Kun katkohitsatun C-paalin poikkileikkauksen myötökuormana käytetään alapaalin reiän kohdalla laskettua arvoa $N_{c,y.p.r} = 493,3$ kN, huomataan taulukon 4.10 arvoista, että nurjahduskuorma $P_{cr.FEM}$ saa myötökuorman arvon nurjahduspituuden L_n ollessa välillä 1400 – 1500 mm. Interpoloimalla saadaan nurjahduspituudeksi $L_n = 1444$ mm. Kuvaan 4.12 on piirretty taulukon 4.10 FEM-menetelmällä lasketut nurjahduskuormat sekä myötökuorman arvo ja määritetty näistä katkohitsillä 40(60) hitsatun C-paalin puristuskestävyyden ominaisarvo nurjahduspituuden mukaan.



Kuva 4.12. Katkohitsillä 40(60) hitsatun C-paalin puristuskestävyys $N_{c,p}$ eri nurjahduspituuksilla L_n .

Jatkoksen puristuskestävyys

Holkkijatkoksen toiminta C-paalin keskeisessä puristuksessa riippuu yhteen liitettävien paalujen välisestä kontaktipinnasta. Kontaktipinnan ollessa täydellinen voidaan olettaa, että puristusvoima siirtyy täysin kontaktipinnan kautta toiselle paalulle, jolloin jatkoksen puristuskestävyys on yhtä suuri kuin paalin puristuskestävyys. Kontaktipinta voi C-paalujen jatkamisen yhteydessä jäädä vajaaksi johtuen esimerkiksi paalujen päiden epätasaisuudesta, paalujen vinoudesta tai siitä, ettei paalua ole painettu jatkoksen pohjaan saakka. Mikäli jatkettavien paalujen välille jää C-paalujen jatkamisen yhteydessä rako, välittyy puristuskuorma osittain tai kokonaan holkkijatkoksen hitsien välityksellä. Hitsien murtuessa voidaan olettaa paalujen välisen raon painuvan umpeen, jolloin puristusvoima siirtyy jälleen kokonaan kontaktipinnan välityksellä paalulta toiselle.

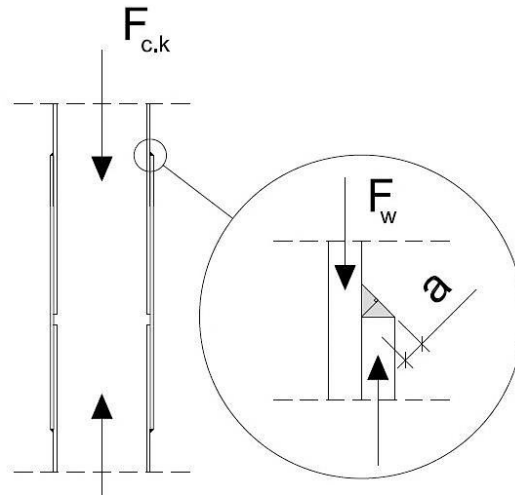
C-paalu saattaa joutua suunnitellun käyttöikänsä aikana välillä puristetuksi ja välillä vedetyksi. C-paalin holkkijatkos välittää vetokuormaa ainoastaan hitsien avulla. Jotta jatkoksen hitsiliitos ei murtuisi puristuksessa, on joko holkkijatkoksen hitsiliitokset suunniteltava siten, että ne niillä on riittävä kapasiteetti siirtää puristava kuorma paalulta

toiselle tai huolehdittava, ettei jatkettavien paalujen välille jää rakoa asennuksen aikana esimerkiksi asentamalla tiivisterengas paalujen välille.

Holkkijatkoksen siirtäessä puristuskuorman hitsin välityksellä, voidaan hitsin kestävyys ominaisarvo laskea soveltamalla standardin EN 1993-1-8 kohdassa 4.5.3.3 esitettyä yksinkertaistettua menetelmää. Menetelmässä lasketaan hitsin kestävyys yksikköpituutta kohti F_w riippumatta hitsin laskentapoikkipinnan suunnasta kaavalla

$$F_w = \frac{f_u}{\beta_w \sqrt{3}} a, \quad (4.22)$$

missä f_u on heikomman liitettävän osan vetomurtolujuuden nimellisarvo, β_w on pienahitsin korrelaatiokerroin ja a on kuvan 4.4 mukainen efektiivinen mitta. Kaavan (4.22) perusteella laskettua hitsin kestävyysarvoa verrataan hitsiin kohdistuvaan kokonaisvoimaresultanttiin. (SFS-EN 1993-1-8, s. 47).



Kuva 4.13. Hitsatun holkkijatkoksen puristuskestävyyden määrittäminen.

Kuvan 4.13 tapauksessa, jossa holkkijatkos on hitsattu pienahitsillä holkkijatkoksen päästä C-paaluun ainoastaan särmältä, hitsin efektiivinen a -mitta on enintään 4,2 mm. Käyttämällä efektiivistä a -mittaa 4,0 mm, vetomurtolujuuden f_u arvoa 470 MPa ja standardin EN 1993-1-8 taulukon 4.1 mukaista pienahitsin korrelaatiokerrointa $\beta_w = 0,9$, voidaan kaavan (4.22) avulla määrittää hitsin kautta välittyvän puristuskuorman ominaisarvo eri hitsauspituuksilla $l_{w,j}$:

$$N_{j,w}(l_{w,j}) = F_w l_{w,j} = \frac{f_u}{\beta_w \sqrt{3}} a l_{w,j}. \quad (4.23)$$

Kuvan 4.13 tapauksessa suurin mahdollinen pienahitsin kautta välittyvä puristuskuorman ominaisarvo saadaan laskettua kaavalla (4.23), kun holkkijatkos hitsataan kokonaan ympäri, jolloin hitsin pituus $l_{w,j} = 264,0$ mm (paalun piiri $s_{p,w,0}$):

$$N_{j,w}(264,0 \text{ mm}) = 318,4 \text{ kN}.$$

Laskettu arvo 318,4 kN on ainoastaan 64,5 % C-paalun alimmasta myötökuorman arvosta. Jos C-paalu suunnitellaan ottavan vastaan puristuskuormien, jotka ylittävät arvon 318,4 kN, lisäksi joissain kuormitustapauksissa vetokuormia, tulee huolehtia riittävästä kontaktipinnasta liitettävien paalujen välillä. Holkkijatkoksen vaikutusta C-paalun puristuskestävyyteen tutkitaan nurjahduskokeiden ja jatkoksen puristuskokeiden avulla kohdissa 5.5 ja 5.6.

4.3 Vedetty poikkileikkaus

C-paalun vetokestävyys

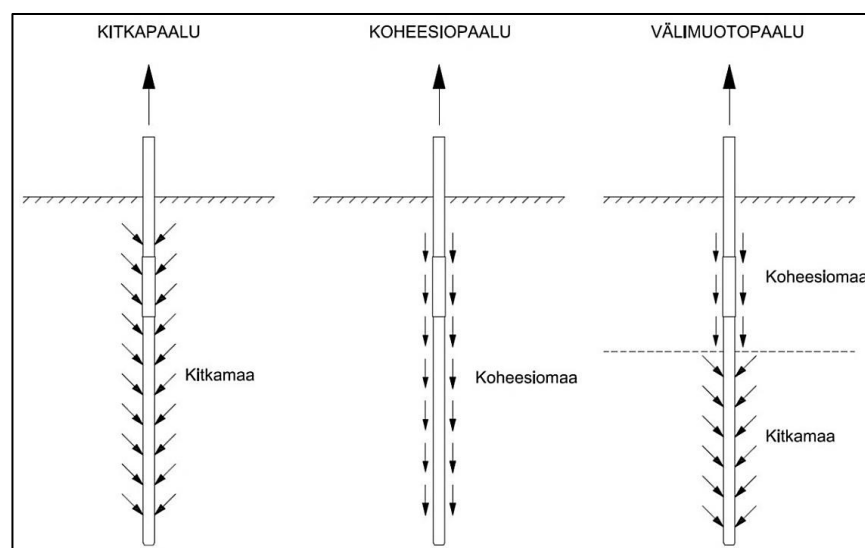
Keskeisesti vedetyn poikkileikkauksen kestävyuden ominaisarvo voidaan laskea kaavalla:

$$N_t = A f_y. \quad (4.24)$$

Kaava on sama kuin puristetun C-paalun myötökuorman määrittämiseen käytetty kaava. Tällöin C-paalun vetokestävyuden ominaisarvoksi paalun eri kohdissa saadaan samat kuin puristetun C-paalun myötökuorman arvot:

katkohitsin kohdalla	$N_{t.p.w} = N_{c.y.p.w} = A_{p.w.0} f_y = 564,2 \text{ kN},$
katkohitsien välissä	$N_{t.p.0} = N_{c.y.p.0} = A_{p.0} f_y = 557,2 \text{ kN},$
alapaalun reiän kohdalla	$N_{t.p.r} = N_{c.y.p.r} = A_{p.r.0} f_y = 493,3 \text{ kN},$
kärjen kohdalla	$N_{t.p.k} = N_{c.y.p.k} = A_{p.k.0} f_y = 519,7 \text{ kN}.$

C-paalu toimii kitka- tai koheesiopaaluna kuvan 4.14 mukaisesti, jolloin vetorasitus ei kohdistu paalun kärkeen vaan varsiosaan. Kuvassa 4.14 vetorasitus välittyy paalun vaippapinnan ja ympäröivän maan välisen kitkan ja/tai adheesioon välityksellä (Winterkorn & Fang 1975, s. 557)



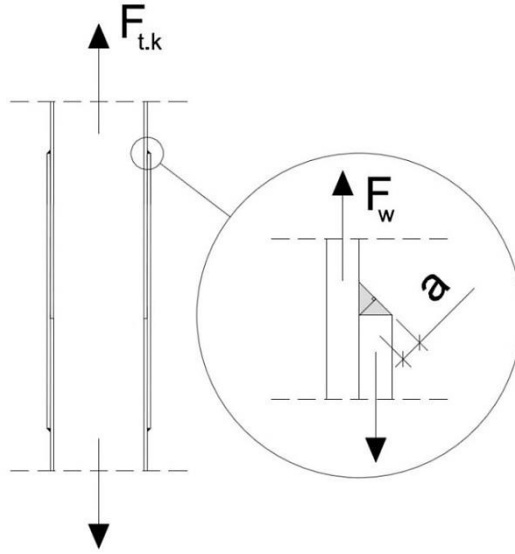
Kuva 4.14. Vedetyn ankkuroimattoman C-paalun toiminta kitka- tai koheesiopaaluna (Winterkorn & Fang 1975, s. 557, muokattu kuvasta 19.3).

Tällöin ankkuroimattoman C-paalun vetokestävyyden ominaisarvo $N_{t,p}$ määräytyy varisiosan pienimmän vetokestävyyden mukaan, joka sijaitsee katkohaitsien välissä:

$$N_{t,p} = N_{t,p,0} = 557,2 \text{ kN.}$$

Jatkoksen vetokestävyys

Hitsatussa holkkijatkoksessa vetorasitus välittyy paalun osalta toiselle hitsin avulla. Jatkoksen vetokestävyyden ominaisarvo määräytyy hitsin kestävyiden mukaan, jonka määrittämiseen soveltuva kaava (4.22) esitettiin aiemmin jatkoksen puristuskestävyyttä tutkittaessa.



Kuva 4.15. Hitsatun holkkijatkoksen vetokestävyyden määrittäminen.

Kuvan 4.15 tapauksessa, jossa holkkijatkos on hitsattu pienahitsillä holkkijatkoksen päästä C-paaluun ainoastaan särmiltä, suurin jatkoksen vetokestävyyden ominaisarvo saadaan kaavan (4.23) perusteella hitsaamalla holkkijatkos kokonaan ympäri ($l_{w,j} = 264,0 \text{ mm}$):

$$N_{j,w}(264,0 \text{ mm}) = 318,4 \text{ kN}$$

Standardin EN 1993-5 kansallisen liitteen kohdassa 4.2 on esitetty paalun jatkokselle kestävyys- ja jäykkyysvaatimukset. Vaatimusten mukaan jatkoksen vetokestävyyden ominaisarvon tulee olla vähintään 15 % paalun teräsosan puristuskestävyyden ominaisarvosta $N_{c,k}$, kun korroosiovaraa ei oteta huomioon (NA SFS-EN 1993-5, kohta 7.4.2). Kuvan 4.15 mukaisen jatkoksen pienahitsin pituus voidaan optimoida tämän vaatimuksen ja kaavan (4.23) avulla:

$$l_{w,j,min} > 0,15 \frac{N_{c,p}}{F_w} = 0,15 \frac{N_{c,p} \beta_w \sqrt{3}}{f_u a} \quad (4.24)$$

C-paalun puristuskestävyys riippuu nurjahduspituudesta, mutta sijoittamalla kaavaan (4.24) puristuskestävyyden $N_{c,p}$ arvoksi myötökuorma $N_{c,y.p.r} = 493,3$ kN ja käyttämällä arvoja $a = 4,0$ mm, $f_u = 470$ MPa ja $\beta_w = 0,9$, saadaan holkkijatkoksen hitsin vähimmäispituudeksi

$$l_{w,j.min} > 61,4 \text{ mm}.$$

Jos holkkijatkosta ei hitsata ympäri asti vaan käytetään katkohitsiä, tulee hitsi jakaa C-paalun särmille siten, että vetorasitus jakautuu tasaisesti jokaiselle katkohitsille. Standardin EN 1993-5 kansallisen liitteen mukainen jatkoksen vähimmäisvetokestävyys saavutetaan, jos jokaiselle särmälle sijoitetaan $l_w \geq 9$ mm pitkä pienahitsi ($a \geq 4,0$ mm). Vetorasituksen voidaan olettaa jakautuvan riittävän tasaisesti, jos vähimmäishitsipituus jaetaan tasaisesti C-paalun jokaiselle seitsemälle särmälle siten, että katkohitsin pituussuuntainen keskikohta sijaitsee särmän keskellä.

Vetävän kuorman ollessa epäkeskeinen tulee epäkeskeisyydestä aiheutuva momentti ottaa huomioon. Vedetyn ja taivutetun poikkileikkauksen ominaiskestävyyden laske-
mista käsitellään kohdassa 4.5.

4.4 Taivutettu poikkileikkaus

C-paalun taivutuskestävyys

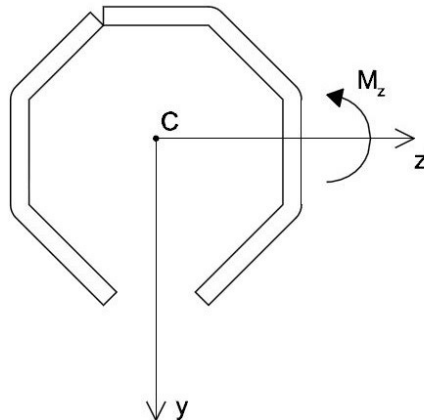
Kun poikkileikkaus on symmetrinen tai jos koordinaattiakselit sijoitetaan yhtymään poikkileikkauksen pääjäyhyysakseleihin, voidaan taivutuskestävyys määrittää puhtaan taivutuksen aiheuttaman normaalijännityksen avulla kaavasta:

$$\sigma_x(y, z) = \frac{M_z}{I_z} y + \frac{M_y}{I_y} z. \quad (4.25)$$

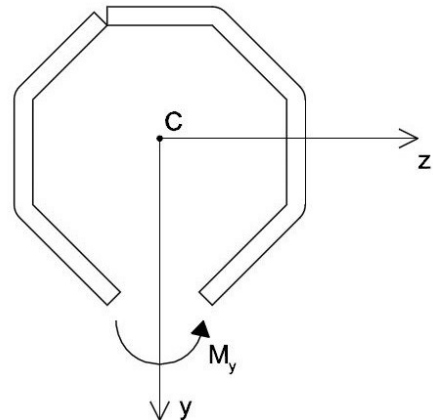
Poikkileikkauksen taivutuskestävyys saavutetaan, kun normaalijännitys ylittää poikkileikkauksen reunalla myötörajan f_y .

Aiemmin tehtyjen C-paalujen koeasennusten perusteella C-paalun hahlon suuntaaminen haluttuun suuntaan on vaikeaa. Tällöin kuormituksesta aiheutuva taivutusmomentti voi kohdistua C-paaluun missä suunnassa tahansa, minkä vuoksi C-paalun taivutuskestävyyden ominaisarvo määritetään ainoastaan sen heikoimman arvon mukaan. C-paalu kestää taivutusta heikoiten, kun sitä taivutetaan ainoastaan z-akselin ympäri kuvan 4.16 mukaisesti.

Taivutus heikoimpaan suuntaan



Taivutus vahvimpaan suuntaan



Kuva 4.16. C-paalun taivutus heikoimpaan ja vahvimpaan suuntaan.

Sijoittamalla normaalijännityksen σ arvoksi myötörajan arvo $f_y = 355$ MPa sekä käyttämällä jäyhyysmomenttia $I_z = 1,456 \times 10^6$ mm⁴ ja reunaetäisyyttä $y = 51,8$ mm saadaan kaavan (4.25) perusteella C-paalun taivutuskestävyyden pienimmäksi ominaisarvoksi:

$$M_p = M_z = \frac{I_z}{y} f_y = 9,98 \text{ kNm}.$$

Lasketaan vertailun vuoksi C-paalun taivutuskestävyyden suurin ominaisarvo, joka saadaan kun poikkileikkausta taivutetaan ainoastaan y-suunnassa kuvan 4.16 mukaisesti. Käyttämällä jäyhyysmomenttia $I_y = 1,783 \times 10^6$ mm⁴ ja reunaetäisyyden arvoa $z = 44,0$ mm saadaan kaavan (4.25) perusteella suurimmaksi taivutuskestävyyden arvoksi:

$$M_y = \frac{I_y}{z} f_y = 14,39 \text{ kNm},$$

joka on 44,2 % suurempi kuin taivutuskestävyys heikoimpaan suuntaan.

C-paalun taivutusjäykkyys

Poikkileikkauksen taivutusjäykkyyden EI teoreettinen arvo saadaan laskettua kimmo kertoimen E ja jäyhyysmomentin I tulona. Käyttämällä kimmokertoimen arvona $E = 210$ GPa voidaan laskea ehjän C-paalun taivutusjäykkyys eri suuntiin, kun $I_z = 1,456 \times 10^6$ mm⁴ ja $I_y = 1,783 \times 10^6$ mm⁴:

Taivutus

z-akselin ympäri: $EI_z = 305,76 \text{ kNm}^2,$

y-akselin ympäri: $EI_y = 374,43 \text{ kNm}^2.$

Jatkoksen taivutuskestävyys ja -jäykkyys

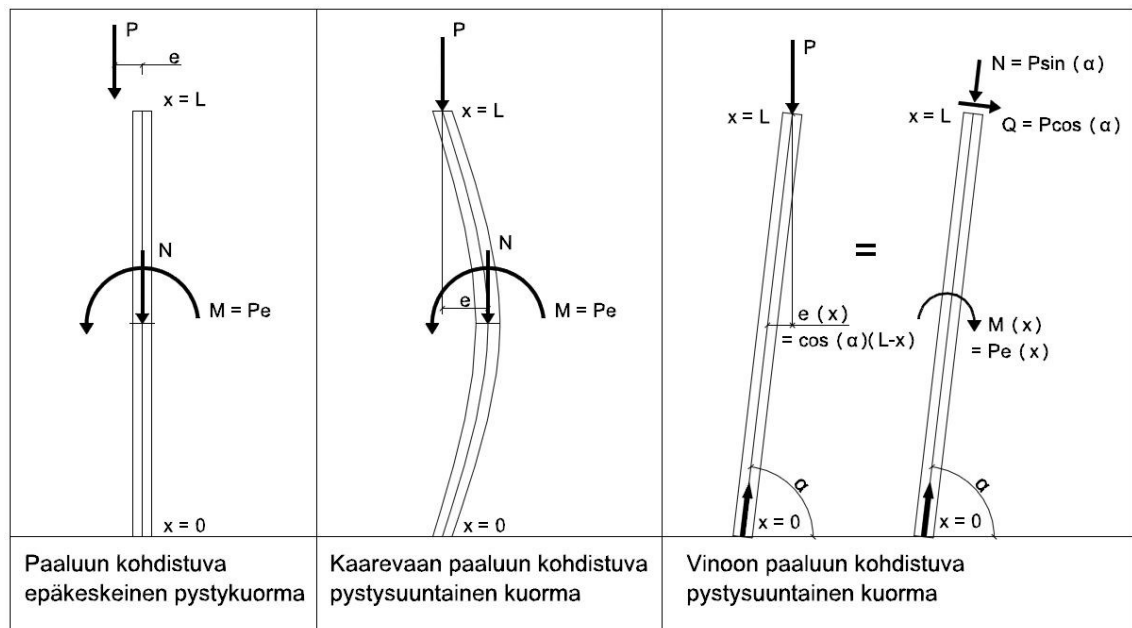
Paalun jatkoksen taivutusjäykkyydellä on merkittävä vaikutus paalun toimintaan. Jatkoksen on oltava riittävän jäykkä suhteessa liitettäviin paalun osiin, jotta asennuksen tai kuormituksen aikana paalu toimisi mahdollisimman yhtenäisesti. Jos paalun jatkoksen

taivutuskestävyys on heikompi kuin ehjän paalun, voi asennuksen aikana jatkettun paalun alkutaipuma kasvaa, jolloin nurjahduskestävyys pienenee. Jatkettun paalun suunnittelun kannalta on helpointa, kun jatkoksen taivutusjäykkyys on yhtä suuri tai hieman suurempi kuin jatkamattoman paalun taivutusjäykkyys. Tällöin jatkoksen taivutusjäykkyys voidaan jättää huomioimatta esimerkiksi laskettaessa paalun nurjahduskestävyyttä.

C-paalujen jatkosten taivutuskestävyydelle ja –jäykkyydelle on asetettu standardin EN 1993-5 kansallisessa liitteessä vaatimukset sekä esitetty taivutuskoe, jonka avulla jatkettun paalun vaatimustenmukaisuus voidaan testata. Kansallisessa liitteessä jatkettulle paalulle asetetut vaatimukset käsitellään diplomityön kohdassa 5.4, jossa C-paalun ja jatkettun C-paalun taivutuskestävyyttä ja –jäykkyyttä on tutkittu kokeellisesti standardin EN 1993-5 kansallisessa liitteessä esitetyn jatkoksen taivutuskokeen avulla. (NA SFS-EN 1993-5, kohta 7.4.2).

4.5 Kuormien yhteisvaikutukset

Poikkileikkaukseen kohdistuvien yksittäisten voimasuureiden sijaan paaluihin kohdistuu yleensä samanaikaisesti useita eri kuormituksia. Ulkoisten kuormien lisäksi, jotka esitettiin aiemmin kuvassa 2.2, paalun poikkileikkaukseen voi kohdistua taivutusta kuvassa 4.17 esitettyjen esimerkkien mukaisesti paalun pituussuuntaisesta kuormasta sen ollessa epäkeskeinen tai paalun ollessa kaareva. Kuvassa 4.17 on esitetty myös tilanne, jossa pystysuuntainen kuorma aiheuttaa taivutusmomentin vinossa olevaan paaluun. Kuvan 4.17 esimerkit soveltuvat myös tilanteisiin, jossa pystysuuntainen kuorma on vetävä.



Kuva 4.17. Paaluun kohdistuvan pystykuorman aiheuttama taivutusmomentti.

Kun poikkileikkaus on symmetrinen tai jos koordinaattiakselit sijoitetaan yhtymään poikkileikkauksen pääjäyhyysakseleihin, voidaan tilanteessa, jossa poikkileikkausta

kuormittavat voimaresultantit tunnetaan, tarkistaa ettei normaalijännitys σ_x ylitä missään poikkileikkauksen keskiviivan pisteessä s ylitä sallittua myötörajan arvoa f_y kaavalla (Vlasov 1961, s. 49):

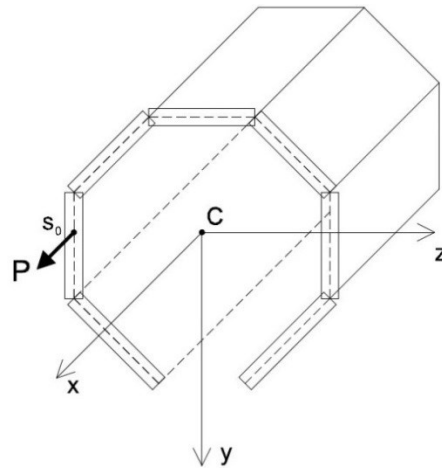
$$\sigma_x(s) = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{I_z} y(s) + \frac{M_y}{I_y} z(s) + \frac{B}{I_\omega} \omega(s) \leq f_y. \quad (4.26)$$

Kaavan (4.26) ensimmäinen termi on normaalivoiman N osuus, toinen ja kolmas termi taivutusmomenttien M_z ja M_y osuudet ja viimeinen bimomentin B osuus normaalijännityksestä. Bimomentin aiheuttama normaalijännitys syntyy, kun vääntörasitetun avoimen ohutseinämäisen sauvan poikkileikkaukset eivät pysy tasoina vaan ne pyrkivät käyristymään. Bimomentin aiheuttama normaalijännitys on sektoriaalisen koordinaatin muotoinen ja se voidaan laskea kaavalla (Vlasov 1961, s.48):

$$B = \int_A \sigma_x \omega dA = \int \sigma_x \omega t ds. \quad (4.27)$$

Avoimeen ohutseinämäiseen poikkileikkaukseen voi kohdistua myös ulkoinen bimomentti \bar{B} . Ulkoinen bimomentti on eräänlainen kuomaresultantin aiheuttama momentti, jonka momenttivartena on voiman vaikutuspisteessä s_0 laskettu sektoriaalinen koordinaatti. Kuvassa 4.18 on esitetty tilanne, jossa poikkileikkauksen pisteeseen s_0 kohdistuu pituusakselin suuntainen pistekuorma P . Pistekuorman aiheuttama ulkoinen bimomentti \bar{B} voidaan laskea kaavalla (Vlasov 1961, s. 111–113):

$$\bar{B} = P\omega(s_0). \quad (4.28)$$



Kuva 4.18. C-paalun poikkileikkauksessa pisteessä s_0 vaikuttava pistekuorma P .

Puristetun ja taivutetun C-paalun nurjahduskestävyys

Puristetun ja taivutetun C-paalun nurjahduskestävyys voidaan määrittää laskemalla ensin kriittinen puristuskuorma nurjahdustehtävästä ja myötökuorma jännitystehtävästä. Tämän jälkeen vertaamalla nurjahdus- ja jännitystehtävästä saatavia puristuskuorman kriittisiä arvoja saadaan niistä pienempi määrääväksi nurjahduskestävyyden arvoksi. Vlasov esittää avointen ohutseinämäisten sauvojen taivutusvääntönurjahdusteoriassa

yhtälön, joka ottaa kriittisen nurjahduskuorman laskemisessa huomioon puristuksen sekä taivutusmomentit, jotka kohdistuvat poikkileikkaukseen kuormituksen alkutilassa. Puristetun ja taivutetun C-paalun kriittinen puristuskuorma saadaan laskettua nurjahdustehtävästä (Vlasov 1961, s. 274):

$$\begin{vmatrix} P_w - P & 0 & -(M_z + y_V P) \\ 0 & P_v - P & -(M_y - z_V P) \\ -(M_z + y_V P) & -(M_y - z_V P) & r^2(P_\phi - P) - 2\beta_z M_y + 2\beta_y M_z \end{vmatrix} = 0, \quad (4.29)$$

missä M_y ja M_z ovat alkutilan taivutusmomentit ja apusuureet β_y ja β_z :

$$\beta_y = \frac{I_y}{2(I_y I_z - I_{yz}^2)} \int_A y(y^2 + z^2) dA - \frac{I_{yz}}{2(I_y I_z - I_{yz}^2)} \int_A z(y^2 + z^2) dA - y_V,$$

$$\beta_z = \frac{I_z}{2(I_y I_z - I_{yz}^2)} \int_A z(y^2 + z^2) dA - \frac{I_{yz}}{2(I_y I_z - I_{yz}^2)} \int_A y(y^2 + z^2) dA - z_V.$$

(Vlasov 1961, s. 263–277.)

Jos poikkileikkaukseen kohdistuu epäkeskeinen kuormitus, voidaan yhtälössä (4.29) alkutilan taivutusmomentit laskea suoraan puristavan kuorman ja sen epäkeskeisyyksien e_y ja e_z tuloina, jolloin $M_y = P e_z$ ja $M_z = P e_y$. Huomataan, että aiemmin esitetty keskeisesti puristetun C-paalun nurjahduskestävyyden määrittämiseen käytetty yhtälö (4.18) on yhtälön (4.29) erikoistapaus, jossa $M_y = 0$ ja $M_z = 0$. Yhtälöstä (4.29) saadaan kolme ratkaisua P_1 , P_2 ja P_3 , joista pienin on nurjahdustehtävän kriittinen puristuskuorma.

Puristetun ja taivutetun sauvan, jonka taivutusjäykkyys EI on vakio, jännitystehtävien myötökuorman arvot voidaan laskea taipumien v ja w differentiaaliyhtälöiden avulla (Timoshenko 1961, s. 11):

$$v^{(4)} + k_y^2 v'' = \frac{q_y}{EI_y}, \quad (\text{taivutus } z\text{-akselin ympäri}) \quad (4.30)$$

$$w^{(4)} + k_z^2 w'' = \frac{q_z}{EI_z}, \quad (\text{taivutus } y\text{-akselin ympäri}) \quad (4.31)$$

missä q on sauvan pintakeskiöakselilla taipuman suuntaan vaikuttava viivakuorma ja

$$k_y = \sqrt{\frac{P}{EI_y}} \text{ sekä } k_z = \sqrt{\frac{P}{EI_z}}.$$

Differentiaaliyhtälöiden (4.30) ja (4.31) ratkaisut ovat muotoa:

$$v(x) = A_a \sin(k_y x) + B_a \cos(k_y x) + C_a x + D_a + v_p, \quad (4.32)$$

$$w(x) = A_b \sin(k_z x) + B_b \cos(k_z x) + C_b x + D_b + w_p, \quad (4.33)$$

missä v_p ja w_p on viivakuormista q riippuvat yksityisratkaisut. Ratkaisemalla yhtälön (4.32) ja (4.33) integroimisvakiot reunaehtoien avulla saadaan ratkaistua taipumien yhtälöt. Kun tiedetään, että taivutusmomentin ja taipuman välinen yhteys on muotoa

$$M_z(x) = -EI_z v''(x), \quad (4.34)$$

$$M_y(x) = -EI_y w''(x), \quad (4.35)$$

voidaan taipuman yhtälöiden toiset derivaatat sijoittaa taivutusmomentin yhtälöihin (4.34) ja (4.35). Tämän jälkeen sijoittamalla taivutusmomentin kaavat (4.34) ja (4.35) normaalijännityksen kaavaan (4.26), saadaan yhtälö:

$$\sigma_x(x) = \frac{-P}{A} + \frac{-EI_z v''(x)}{I_z} y + \frac{-EI_y w''(x)}{I_y} z \leq f_y, \quad (4.36)$$

josta voidaan ratkaista myötökuorman arvo, jolla sallittu myötöraja f_y saavutetaan.

4.6 Leikkauskestävyys

Kun poikkileikkausta kuormittavat voimaresultantit tunnetaan, voidaan avoimen ohutseinämäisen profiilin leikkauskestävyys tarkistaa laskemalla poikkileikkauksen keskiviivan suuntainen leikkausjännitysjakauma τ_{xs} ja vertaamalla sitä sallitun leikkausjännityksen arvoon $f_y/\sqrt{3}$:

$$\tau_{xs}(s) = \overline{\tau_{xs}}(s) + \tau_{xs}^t(s) \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}}, \quad (4.37)$$

missä s on profiilin keskiviivan koordinaatti, $\overline{\tau_{xs}}(s)$ on leikkausvuota vastaava keskimääräinen leikkausjännitys, joka on poikkileikkauksen paksuussunnassa vakio ja $\tau_{xs}^t(s)$ on Saint Venant'in väännön leikkausjännitys, joka jakautuu poikkileikkauksen paksuussunnassa lineaarisesti ollen keskiviivalla nolla. Poikkileikkauksen pääjäyhyyskoordinaatistossa voidaan poikkileikkauksen keskiviivan suuntainen keskimääräinen leikkausjännitys $\overline{\tau_{xs}}(s)$ laskea kaavalla (Vlasov 1961, s. 51):

$$\overline{\tau_{xs}}(s) = \frac{Q_y S_z(s)}{I_z t(s)} + \frac{Q_z S_y(s)}{I_y t(s)} + \frac{M_\omega S_\omega(s)}{I_\omega t(s)}, \quad (4.38)$$

missä $t(s)$ on poikkileikkauksen paksuus, Q_y ja Q_z ovat pääjäyhyysakselien suuntaiset leikkausvoimaresultantit ja M_ω sektoriaalinen vääntömomentti. Keskimääräisestä leikkausjännityksestä aiheutuva sektoriaalinen vääntömomentti M_ω on bimomentin B derivaatta (Vlasov 1961, s. 51).

Saint Venant'in leikkausjännitys $\tau_{xs}^t(s)$ voidaan laskea kaavasta:

$$\tau_{xs}^t(s) = \frac{M_t}{W_t(s)}, \quad (4.39)$$

missä M_t on vääntömomentti ja $W_t(s)$ on vääntövastus, joka lasketaan kaavalla:

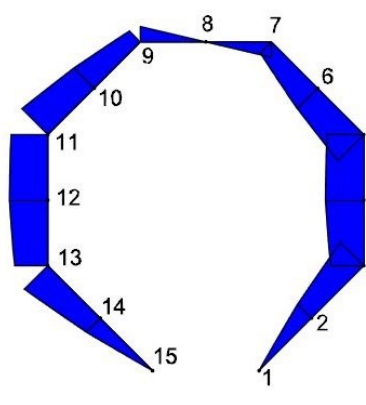
$$W_t(s) = \frac{I_t}{t(s)}. \quad (4.40)$$

Leikkauskestävyys puhtaiden leikkausten tapauksissa

Lasketaan C-paalun poikkileikkauksen leikkauskestävyyden arvot ns. puhtaiden leikkausten tapauksissa, joissa vaikuttaa ainoastaan pääjäyhyysakselin suuntainen leikkausvoima Q_y tai Q_z . Aloitetaan laskemalla sallittavan leikkausvoiman Q_y arvo, kun $Q_z = 0$, $M_\omega = 0$ ja $M_t = 0$. Käyttämällä taulukossa 4.4 esitettyjä staattisen momentin S_z arvoja, jäyhyysmomenttia $I_z = 1,456 \times 10^6 \text{ mm}^4$ ja seinämäpaksuutta $t = 6 \text{ mm}$ saadaan kaavan (4.38) avulla keskimääräiseksi leikkausjännitykseksi taulukon 4.11 arvot.

Taulukko 4.11. Keskimääräinen leikkausjännitys, kun poikkileikkaukseen kohdistuu Q_y .

i	$\overline{\tau_{xs}}(s_i) \text{ [MPa]}$	i	$\overline{\tau_{xs}}(s_i) \text{ [MPa]}$
1	0	9	$Q_y \times 496,0 \times 10^{-6}$
2	$Q_y \times (-630,0 \times 10^{-6})$	10	$Q_y \times 911,1 \times 10^{-6}$
3	$Q_y \times (-1053,5 \times 10^{-6})$	11	$Q_y \times 1164,6 \times 10^{-6}$
4	$Q_y \times (-1223,1 \times 10^{-6})$	12	$Q_y \times 1223,1 \times 10^{-6}$
5	$Q_y \times (-1164,6 \times 10^{-6})$	13	$Q_y \times 1053,5 \times 10^{-6}$
6	$Q_y \times (-911,1 \times 10^{-6})$	14	$Q_y \times 630,0 \times 10^{-6}$
7	$Q_y \times (-496,0 \times 10^{-6})$	15	0
8	0		



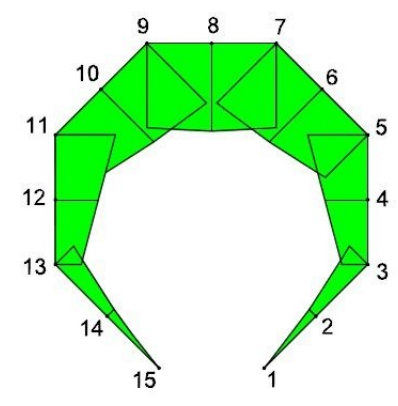
Taulukon 4.11 arvoista nähdään, että itseisarvoltaan suurin keskimääräinen leikkausjännitys on nyt poikkileikkauksen pisteissä 4 ja 12. Kun poikkileikkaukseen ei kohdistu muita kuormia kuin leikkausvoima Q_y voidaan kaavasta (4.37) ratkaista se leikkausvoiman arvo $Q_{y,max}$, jolla pisteissä 4 ja 12 saavutetaan sallittu leikkausjännitys $f_y/\sqrt{3} \approx 204,96 \text{ MPa}$:

$$Q_{y,max} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1223,1 \times 10^{-6} \frac{1}{\text{mm}^2}} \approx 167,57 \text{ kN}.$$

Samalla tavalla voidaan laskea suurin sallittu leikkausvoima Q_z tapauksessa, jossa $Q_y = 0$, $M_\omega = 0$ ja $M_t = 0$. Käyttämällä nyt taulukossa 4.4 esitettyjä staattisen momentin S_y arvoja, jäyhyysmomenttia $I_y = 1,783 \times 10^6 \text{ mm}^4$ ja seinämäpaksuutta $t = 6 \text{ mm}$ saadaan kaavan (4.38) avulla keskimääräiseksi leikkausjännitykseksi taulukon 4.12 arvot.

Taulukko 4.12. Keskimääräinen leikkausjännitys, kun poikkileikkaukseen kohdistuu Q_z .

i	$\overline{\tau_{xs}}(s_i)$ [MPa]	i	$\overline{\tau_{xs}}(s_i)$ [MPa]
1	0	9	$Q_z \times (-2216,7 \times 10^{-6})$
2	$Q_z \times (-255,3 \times 10^{-6})$	10	$Q_z \times (-1964,4 \times 10^{-6})$
3	$Q_z \times (-679,4 \times 10^{-6})$	11	$Q_z \times (-1580,1 \times 10^{-6})$
4	$Q_z \times (-1129,7 \times 10^{-6})$	12	$Q_z \times (-1129,7 \times 10^{-6})$
5	$Q_z \times (-1580,1 \times 10^{-6})$	13	$Q_z \times (-679,4 \times 10^{-6})$
6	$Q_z \times (-1964,4 \times 10^{-6})$	14	$Q_z \times (-255,3 \times 10^{-6})$
7	$Q_z \times (-2216,7 \times 10^{-6})$	15	0
8	$Q_z \times (-2309,9 \times 10^{-6})$		



Taulukon 4.12 arvoista nähdään, että itseisarvoltaan suurin keskimääräinen leikkausjännitys on nyt poikkileikkauksen pisteessä 8. Kun poikkileikkaukseen ei kohdistu muita kuormia kuin leikkausvoima Q_z voidaan kaavasta (4.37) ratkaista se leikkausvoiman arvo $Q_{z,max}$, jolla pisteessä 8 saavutetaan sallittu leikkausjännitys:

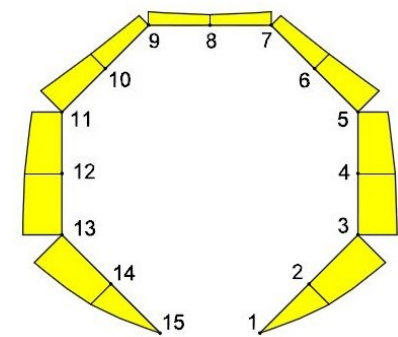
$$Q_{z,max} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\left| -2309,9 \times 10^{-6} \frac{1}{mm^2} \right|} \approx 88,73 \text{ kN}.$$

Vääntökestävyyden laskeminen sallitun leikkausjännityksen avulla

Lasketaan C-paalun vääntökestävyydet poikkileikkauksen keskiviivan suuntaisen leikkausjännitys jakauman avulla tapauksissa, joissa poikkileikkaukseen kohdistuu ainoastaan sektoriaalinen vääntömomentti M_ω tai vääntömomentti M_t . Lasketaan ensi sallittavan sektoriaalisen vääntömomentin M_ω arvo, kun $Q_y = 0$, $Q_z = 0$ ja $M_t = 0$. Käyttämällä taulukossa 4.4 esitettyjä staattisen momentin S_ω arvoja, sektoriaalista jäyhyysmomenttia $I_{\omega_V} = 4,392 \times 10^9 \text{ mm}^6$ ja seinämäpaksuutta $t = 6 \text{ mm}$ saadaan kaavan (4.38) avulla keskimääräiseksi leikkausjännitykseksi taulukon 4.13 arvot.

Taulukko 4.13. Keskimääräinen leikkausjännitys, kun poikkileikkaukseen kohdistuu M_ω .

i	$\overline{\tau_{xs}}(s_i)$ [MPa]	i	$\overline{\tau_{xs}}(s_i)$ [MPa]
1	0	9	$M_\omega \times 759,7 \times 10^{-8}$
2	$M_\omega \times 1615,4 \times 10^{-8}$	10	$M_\omega \times 1154,0 \times 10^{-8}$
3	$M_\omega \times 2207,4 \times 10^{-8}$	11	$M_\omega \times 1682,6 \times 10^{-8}$
4	$M_\omega \times 2111,8 \times 10^{-8}$	12	$M_\omega \times 2111,8 \times 10^{-8}$
5	$M_\omega \times 1682,6 \times 10^{-8}$	13	$M_\omega \times 2207,4 \times 10^{-8}$
6	$M_\omega \times 1154,0 \times 10^{-8}$	14	$M_\omega \times 1615,4 \times 10^{-8}$
7	$M_\omega \times 759,7 \times 10^{-8}$	15	0
8	$M_\omega \times 596,2 \times 10^{-8}$		



Taulukon 4.13 perusteella itseisarvoltaan suurin keskimääräinen leikkausjännitys saavutetaan nyt poikkileikkauksen pisteissä 3 ja 13. Kun poikkileikkaukseen ei kohdistu mui-

ta kuormia kuin sektoriaalinen vääntömomentti M_{ω} voidaan kaavasta (4.37) ratkaista se arvo $M_{\omega, \max}$, jolla pisteissä 3 ja 13 saavutetaan sallittu leikkausjännitys:

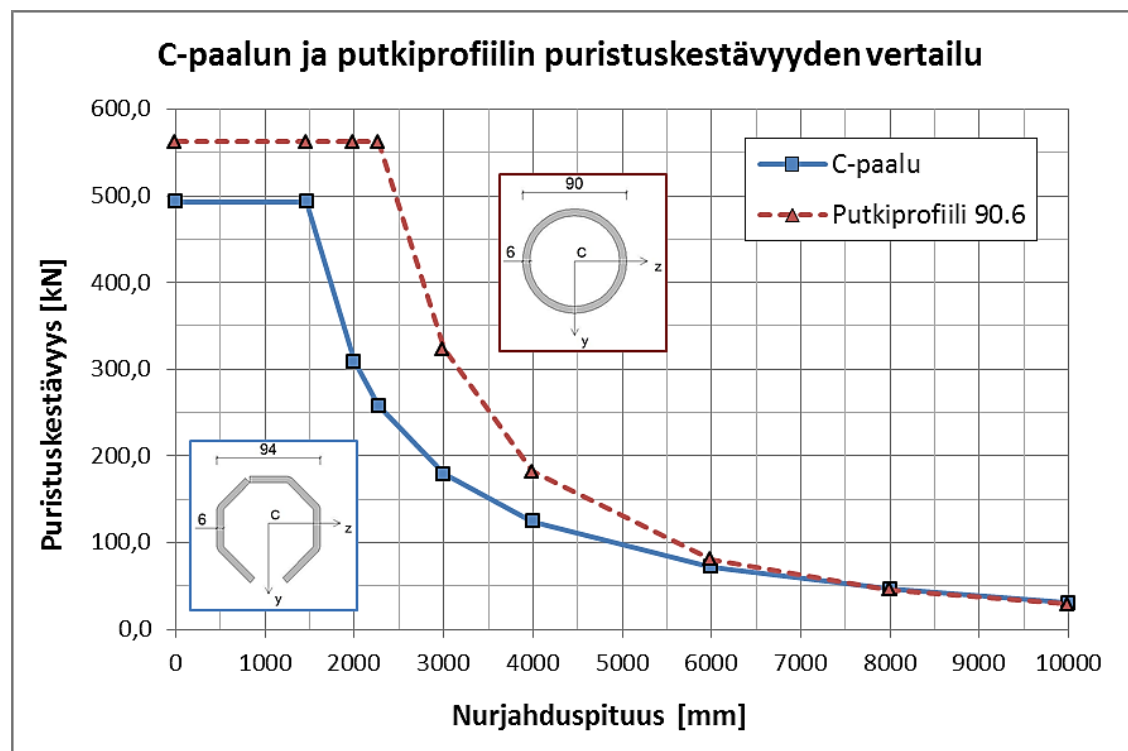
$$M_{\omega, \max} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2207,4 \times 10^{-8} \frac{1}{\text{mm}^3}} \approx 9,29 \text{ kNm}.$$

Tapauksessa, jossa poikkileikkaukseen kohdistuu ainoastaan vääntömomentti M_t ($Q_y = Q_z = M_{\omega} = 0$), voidaan kaavojen (4.37), (4.39) ja (4.40) avulla laskea vääntömomentin arvo $M_{t, \max}$, jolla saavutetaan sallittu leikkausjännitys. Kun vääntöjähyysmomentti on $I_t = 19072,8 \text{ mm}^4$ ja seinämäpaksuus on $t = 6 \text{ mm}$, saadaan:

$$M_{t, \max} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I_t}{t(s)} \approx 0,65 \text{ kNm}.$$

4.7 C-paalun ja putkiprofiilin puristus- ja taivutuskestävyyksien vertailu

Kuvassa 4.19 on esitetty ja vertailtu C-paalun ja kooltaan C-paaluun vastaavan teräsputkiprofiilin teoreettisia puristuskestävyyksiä eri nurjahduspituuksilla keskeisen puristekuorman tapauksessa. Puristuskestävyydet on määritetty samalla tavalla kuin aiemmin kohdan 4.2.2 kuvassa 4.12 esitetyn C-paalun puristuskestävyys, mutta FEM-menetelmän sijasta C-paalulle on käytetty Vlasovin taivutusvääntönurjahdusteoriaa.



Kuva 4.19. C-paalun ja kokoluokaltaan vastaavan putkiprofiilin puristuskestävyyksien vertailu.

Teräsputkiprofiili menettää stabiiliutensa ainoastaan tasonurjahduksen avulla ja koska putkiprofiililla jäyhyydet ovat y- ja z-suunnassa yhtä suuret, on teräsputkiprofiilin nurjahduskestävyyden arvot määritetty kaavan (4.19) avulla. Teräsputkiprofiilin ulkohaikaisija on 90 mm ja seinämävahvuus 6 mm, jolloin sen pinta-ala on $1583,4 \text{ mm}^2$ ja jäyhyysmomentti $I_y = I_z = 1,404 \times 10^6 \text{ mm}^4$. Putkiprofiilin myötörajana käytettiin arvoa 355 MPa ja kimmokertoimena 210 GPa (samat kuin C-paalulla). Kuvan 4.14 arvoista nähdään, että myötökuormaa ylemmillä arvoilla (nurjahduspituus $< 1500 \text{ mm}$) C-paalun puristuskestävyys on 12,2 % pienempi kuin putkiprofiilin. C-paalu poikkeaa puristuskestävyydeltään putkiprofiilista enimmillään -54,1 % kohdassa, jossa nurjahduskuorma määrää molempien poikkileikkauksien puristuskestävyyden ($L_n = 2275 \text{ mm}$). Nurjahduspituuksien kasvaessa ero poikkileikkauksien välillä kapenee. Kuvan 4.19 perusteella C-paalun nurjahduskestävyys poikkeaa ainoastaan -11,1...+3,7 % teräsputkiprofiilista nurjahduspituuden ollessa 6000 - 10000 mm.

Käyttämällä putkiprofiilille myötörajaa 355 MPa ja reunaetäisyyttä 42 mm sekä sen jäyhyysmomenttia $I_y = I_z = 1,404 \times 10^6 \text{ mm}^4$ saadaan kaavan (4.25) perusteella putkiprofiilin taivutuskestävyyden ominaisarvoksi:

$$M_{p.putkiprofiili} = \frac{I_y}{z} f_y = 11,86 \text{ kNm},$$

joka on 18,8 % suurempi kuin C-paalun taivutuskestävyyden pienin ominaisarvo 9,98 kNm, mutta 17,6 % pienempi kuin C-paalun taivutuskestävyyden suurin ominaisarvo 14,39 kNm.

5 Rakennetekniset koekuormitukset

5.1 Koekuormituksissa käytetyt C-paalut

Rakenneteknisissä koekuormituksissa käytettävät koekappaleet työstettiin ja kuormitettiin Aalto-yliopiston rakennetekniikan koehallissa keväällä 2013 tehdystä koepaalutuksesta ylijääneistä, Emeca Oy:n valmistamista, C-paaluista. Käytettävissä oli kuvan 5.1 mukaiset 8 kuusi metristä alapaalua, 8 kuusi metristä jatkospaalua sekä 8 kolme metristä jatkospaalua.



Kuva 5.1. Koekappaleiden valmistuksessa käytetty C-paaluerä.

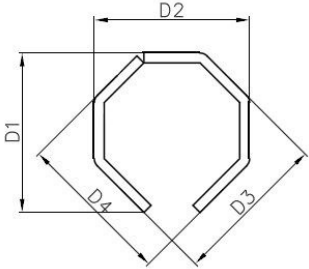
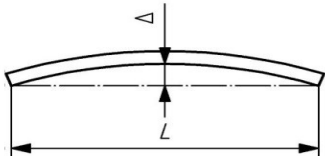
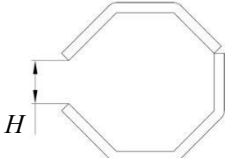
Koekappaleiden valmistukseen käytetyssä C-paaluerässä oli mukana kahdesta eri materiaalierästä valmistettuja paaluja. Kummankin materiaalierän teräslaji oli standardin EN 10149-2 mukaista lujaa kylmämuovattavaa terästä S355MC. Pituussuuntaisten sekä jatkosten tehdashitseissä oli käytetty standardin EN ISO 14341-A mukaista hitsausainetta G3Si1. Kaikissa koehallilla valmistetuissa koekappaleissa käytettiin samaa hitsausainetta kuin tehdashitseissä. Teräslevyjen ja hitsausaineiden ainestodistukset on esitetty liitteessä 4.

Kaikista valmistetuista koekappaleista otettiin taulukon 5.1 mukaiset mitat. Koekappaleiden keskimääräinen poikkipinta-ala laskettiin mitatun tiheyden, painon ja pituuden avulla. Tiheys määritettiin punnitsemalla C-paalusta katkaistu osa ensin ilmassa ja sitten kokonaan veteen upotettuna, jolloin Arkhimedeen lain mukaan saadaan määritettyä kappaleen tiheys kaavasta:

$$\rho_{kappale} = \frac{m_{ilmassa} \rho_{vesi}}{m_{ilmassa} - m_{vedessä}}. \quad (5.1)$$

Koekappaleiden keskimääräiset poikkipinta-alat määritettiin jakamalla koekappaleen massa sen pituudella ja kokeellisesti lasketulla tiheydellä.

Taulukko 5.1. Koekappaleista mitatut poikkileikkausarvot.

Mitattu arvo	Keskiarvo	Keskihajonta	Variaatio- kerroin	Otos
Tiheys ρ	$\rho = 7844,3 \text{ kg/m}^3$	$17,7 \text{ kg/m}^3$	0,23 %	3
Poikkileikkauksen keskimääräinen pinta-ala $A_{p,ka}$	$A_{p,ka} = 1500,9 \text{ mm}^2$	$21,6 \text{ mm}^2$	1,44 %	25
Ulkohalkaisija 	$D1 = 93,9 \text{ mm}$	0,63 mm	0,67 %	50
	$D2 = 91,8 \text{ mm}$	0,76 mm	0,82 %	50
	$D3 = 91,4 \text{ mm}$	0,78 mm	0,86 %	50
	$D4 = 92,0 \text{ mm}$	0,74 mm	0,80 %	50
SuoruuSpoikkeama 	$\frac{\Delta y}{L} = -0,0009$	0,0006	62,82 %	13
	$\frac{\Delta z}{L} = -0,0006$	0,0004	67,31 %	13
Seinämän paksuus t	$t = 6,0 \text{ mm}$	0,08 mm	1,28 %	100
Hahlon leveys 	$H = 25,2 \text{ mm}$	0,63 mm	2,50 %	75
Lyhin katkohaitsi $l_{w,min}$	$l_{w,min} = 41 \text{ mm}$	11,42 mm	27,83 %	24
Suurin katkohaitsien välinen etäisyys $e_{w,max}$	$e_{w,max} = 55 \text{ mm}$	17,13 mm	31,40 %	25

Taulukossa 5.1 esitettyjen koekappaleiden mittojen vaihtelu on pientä variaatiokertoimen ollessa alle 1,5 % poikkileikkauksen keskimääräisen pinta-alan ja seinämäpaksuuden osalta sekä alle 0,9 % ulkohalkaisijoiden osalta. Mittausten perusteella Emeca Oy:n valmistamat C-paalut olivat tasalaatuisia, mutta kun koekappaleiden poikkileikkausmittoja verrataan C-paalujen valmistuskuvien mukaisiin poikkileikkausmittoihin taulukossa 5.2, huomataan että koekappaleet olivat keskimääräisesti valmistuskuvien mukaisia pienempiä. Taulukon 5.2 arvoista nähdään, että koekappaleet poikkesivat tasaisesti ulkohalkaisijoiltaan -2,13...-2,77 % valmistuskuvien mukaisista arvoista. Koekappaleiden poikkileikkauksen keskimääräinen pinta-ala poikkesi keskimäärin -4,75 % valmistuskuvien mukaisesta arvosta seinämäpaksuuden ollessa valmistuskuvien mukainen.

Taulukko 5.2. Koekappaleiden ja valmistuskuvien mukaisten poikkileikkausmittojen vertailu.

Mittausarvo		Valmistus- kuvan mitta	Koekappaleista mitattu keskiarvo	Poikkeama	Suhteellinen ero
Poikkileikkauksen keskimääräinen pinta-ala $A_{p,ka}$ [mm ²]		1575,8 ⁽¹⁾	1500,9	-74,9	-4,75 %
Ulkohalkaisija	D1 [mm]	96,5	93,9	-2,6	-2,69 %
	D2 [mm]	94,0	91,8	-2,2	-2,34 %
	D3 [mm]	94,0	91,4	-2,6	-2,77 %
	D4 [mm]	94,0	92,0	-2,0	-2,13 %
Seinämän paksuus t [mm]		6,0	6,0	0,0	-
Hahlon leveys H [mm]		25,4	25,2	-0,2	-0,79 %
1) Valmistuskuvien mukainen poikkileikkauksen keskimääräinen pinta-ala on laskettu taulukossa 2.1 esitettyjen katkohaitsin kohdalta ja katkohaitsien välistä laskettujen poikkileikkausten pinta-alojen painotettuna keskiarvona. C-paalun pituussuuntaisen katkohaitsin on oletettu jakautuvan taulukon 5.1 arvojen $l_{w,min}$ ja $e_{w,max}$ mukaisesti.					

Koekuormituksissa käytettyjen C-paalujen CE-merkinnän kannalta olennaisten geometristen toleranssien täyttymistä voidaan arvioida vertaamalla taulukon 5.1 arvoja aiemmin taulukossa 3.4 esitettyihin raja-arvoihin. Taulukossa 5.3 on vertailtu geometrisista toleransseista C-paalujen ulkohalkaisijan ja suoruuden keskiarvoja sallittuihin mitta-poikkeamiin.

Taulukko 5.3. Ulkohalkaisijan ja suoruuden vertailu sallittuihin mittapoikkeamiin.

Mitattu arvo		Nimellismitta	Sallittu vaihteluväli
Ulkohalkaisija	D1 = 93,9 mm	96,5 mm	$95,16 \text{ mm} \leq D1 \leq 110,49 \text{ mm}$
	D2 = 91,8 mm	94,0 mm	$91,95 \text{ mm} \leq D2 \leq 106,07 \text{ mm}$
	D3 = 91,4 mm	94,0 mm	$91,95 \text{ mm} \leq D3 \leq 106,07 \text{ mm}$
	D4 = 92,0 mm	94,0 mm	$91,95 \text{ mm} \leq D4 \leq 106,07 \text{ mm}$
Suoruus	$\frac{\Delta y}{L} = -0,0009 \text{ mm}$	0 mm	$-0,0013 \text{ mm} \leq \frac{\Delta y}{L} \leq 0,0013 \text{ mm}$
	$\frac{\Delta z}{L} = -0,0006 \text{ mm}$	0 mm	$-0,0013 \text{ mm} \leq \frac{\Delta z}{L} \leq 0,0013 \text{ mm}$

Taulukon 5.3 mukaan koekuormituksissa käytetyt C-paalut eivät toteuta niille esitettyjä geometrisia toleransseja ulkohalkaisijan D_I osalta. Vaikka CE-merkinnän kannalta merkittävät geometriset toleranssit toteuttavatkin niille esitetyt raja-arvot muiden mittojen osalta, ovat valmistetut C-paalut todellisilta mitoiltaan pienempiä kuin valmistuskuvissa, jolloin valmistuskuvien pohjalta lasketut C-paalun kantokestävyyden ominaisarvot ovat todellisia kantokestävyyden arvoja suurempia. Jotta valmistettavat C-paalut olisivat poikkileikkausmitoiltaan valmistuskuvien mukaisia, tulisi joko C-paalujen valmistusprosessia muuttaa siten, että se tuottaisi suunnitelmien mukaisia C-paaluja tai tulisi valmistuskuvat muuttaa tuotettujen C-paalujen mittojen mukaisiksi.

5.2 Standardin EN ISO 6892-1 mukainen vetokoe

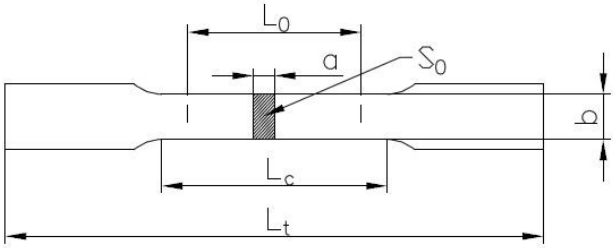
5.2.1 Koejärjestelyt

Rakenneteknisissä koekuormituksissa käytettävien C-paalujen ylemmän myötörajan R_{eH} ja murtolujuuden R_m määrittämiseksi tehtiin 8 kappaletta standardin EN ISO 6892-1 mukaisia vetokokeita. Koenopeutena käytettiin venymän muutosnopeuteen perustuvaa standardin EN ISO 6892-1 mukaista menetelmää A.

Koekappaleet

Vetokokeissa vedettiin taulukon 5.4 mukaisia särmikkäitä suhdesauvoja katkeamiseen asti huoneenlämpötilassa.

Taulukko 5.4. Vetokokeissa käytetyn särmikkään suhdesauvan tunnuksiset ja mitat (SFS-EN ISO 6892-1, kuva 11).

		
Tunnus	Nimellismitta	Käsite
a	6 mm	Lattakoesauvan suoran osan paksuus
b	13 mm	Lattakoesauvan suoran osan leveys
S_0	78 mm ²	Koesauvan suoran osan poikkipinta-ala ennen koetta
L_0	50 mm	Alkumittapituus Standardin ehto: $L_0 = k\sqrt{S_0}$, missä $k = 5,65$
L_c	$\geq 63,2$ mm	Koepituus Standardin ehto: $L_c \geq L_0 + 1,5\sqrt{S_0}$
L_t	155 mm	Koesauvan kokonaispituus

Koesauvan kiinnityspäiden ja koesauvan suoran osan välinen vähimmäispyöristyssäde on 12 mm, muuten koesauvan kiinnityspäiden muotoja koskevia vaatimuksia ei standardeissa ole asetettu. (SFS-EN ISO 6892-1, kohta D.1).

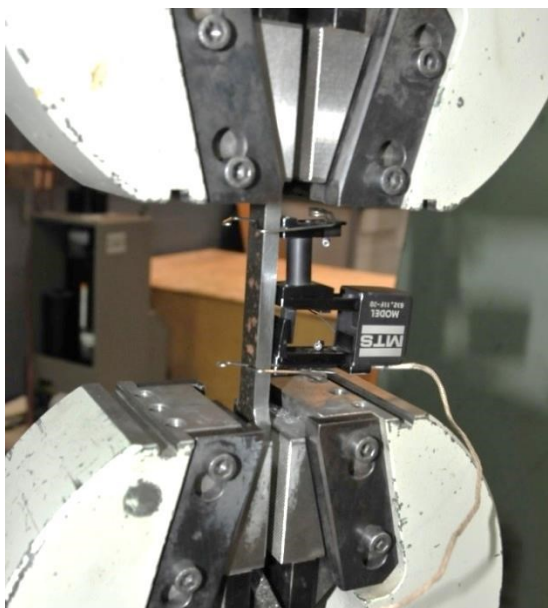
Koekappaleet valmistettiin leikkaamalla C-paalujen eri särmistä kappaleet ja työstämällä ne taulukon 5.4 mukaisten nimellismittojen mukaan. Koska C-paalut oli valmistettu kahdesta eri materiaalierästä, pyrittiin vetokoekappaleita valmistamaan molemmista eristä valitsemalla materiaalit värieron avulla. Kuvassa 5.2 on esitetty kahdesta eri C-paalusta valmistetut vetokoekappaleet M1...M4 ja M5...M8.



Kuva 5.2. Standardin EN ISO 6892-1 mukaiset särmikkäät suhdeseurat M1...M4 ja M5...M8 metallien vetokokeita varten.

Kuormitus- ja mittausjärjestelyt

Standardin EN ISO 6892-1 mukaisissa kokeissa käytettiin vetokoelaitteistona tietokoneohjattua Zwick RK250/50 yleisaineenkoestuslaitetta. Käytetty tietokoneohjelma oli laitevalmistaja Zwickin testXpert II versio 2.0. Tietokoneohjattu vetokoe määrittää automaattisesti ylemmän myötörajan R_{eH} ja murtolujuuden R_m . Tietokoneohjelmalla voidaan määrittää myös materiaalin kimmokerroin halutulta venymäalueelta. Koekappaleen venymä mitattiin käyttämällä hienovenymäanturia MTS 632-11F-20. Kuvassa 5.3 on esitetty vetokoelaitteiston leukoihin kiinnitetty koekappale sekä venymää mittaava hienovenymäanturi.



Kuva 5.3. Vetokoelaitteistoon kiinnitetty koekappale ja hienovenymäanturi.

5.2.2 Mittaustulokset ja niiden arviointi

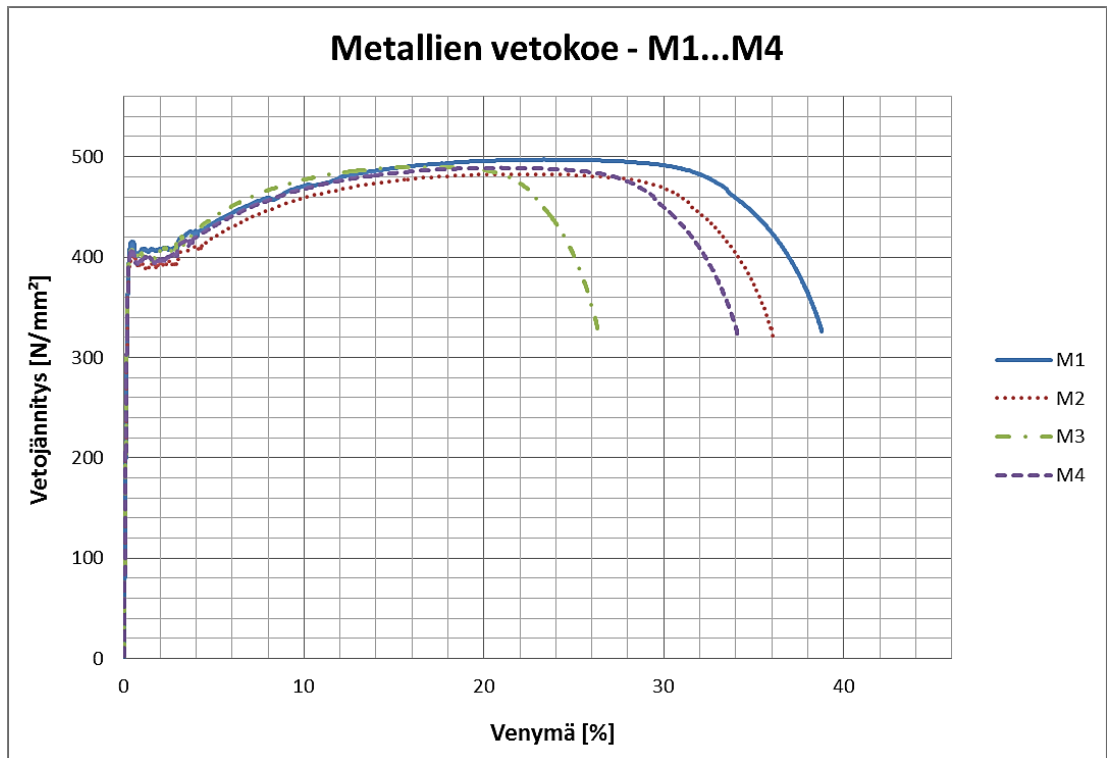
Vetokokeiden tulokset on esitetty taulukoissa 5.5 ja 5.6. Kimmokertoimen E määrittämiselle ei ole standardissa EN ISO 6892-1 ohjetta, mutta se voidaan arvioida laskemalla materiaalin lineaariselta osalta kulmakerroin. Teräksen kimmokerroin E määritettiin venymäalueelta 0,02-0,12 %. Vetokoesauvojen todelliset mitat mitattiin ennen koekuormitusta ja ne on esitetty taulukoissa 5.5 ja 5.6.

Vetokokeiden M1...M4 tulokset

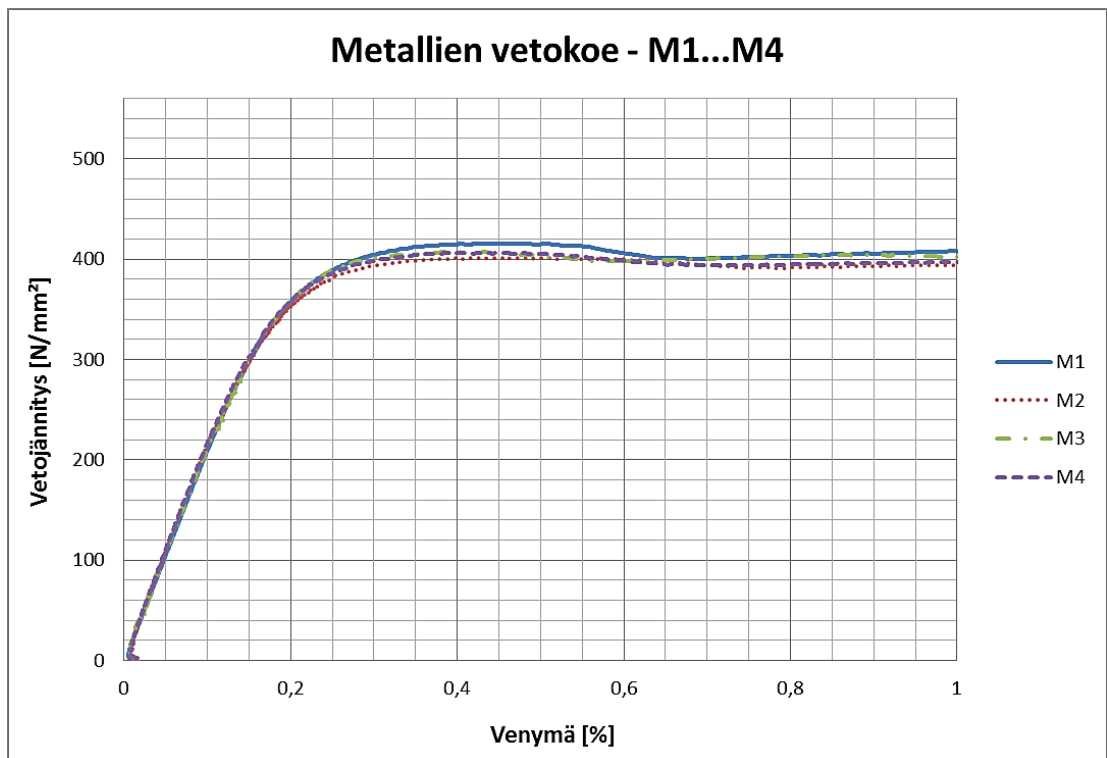
Taulukko 5.5. Vetokokeiden M1...M4 tulokset.

Tunnus	a [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	E [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]
M1	6,039	12,93	78,05	206254	416	497
M2	6,015	12,91	77,67	207408	401	483
M3	6,016	12,99	78,17	203959	407	490
M4	6,036	13,04	78,69	210632	406	489
Keskiarvo	6,027	12,97	78,15	207063	407,5	489,8
Keskihajonta	0,013	0,06	0,42	2778	6,2	5,7
Variaatiokerroin	0,22 %	0,46 %	0,54 %	1,34 %	1,52 %	1,16 %

Vetokokeiden M1...M4 jännitys-venymäkuvaajat on esitetty kuvissa 5.4 ja 5.5, joissa vetojännitys on laskettu koesauvan poikkipinta-alaa S_0 kohti. Kuvassa 5.4 näkyy vetokokeen koko venymäalue ja kuvassa 5.5 on esitetty vetokokeiden jännitys-venymäkuvaajat venymäalueella 0 - 1,0 %, jolloin materiaalin lineaarinen käyttäytyminen on paremmin havaittavissa.



Kuva 5.4. Vetokokeiden M1...M4 jännitys-venymäkuvaajat.



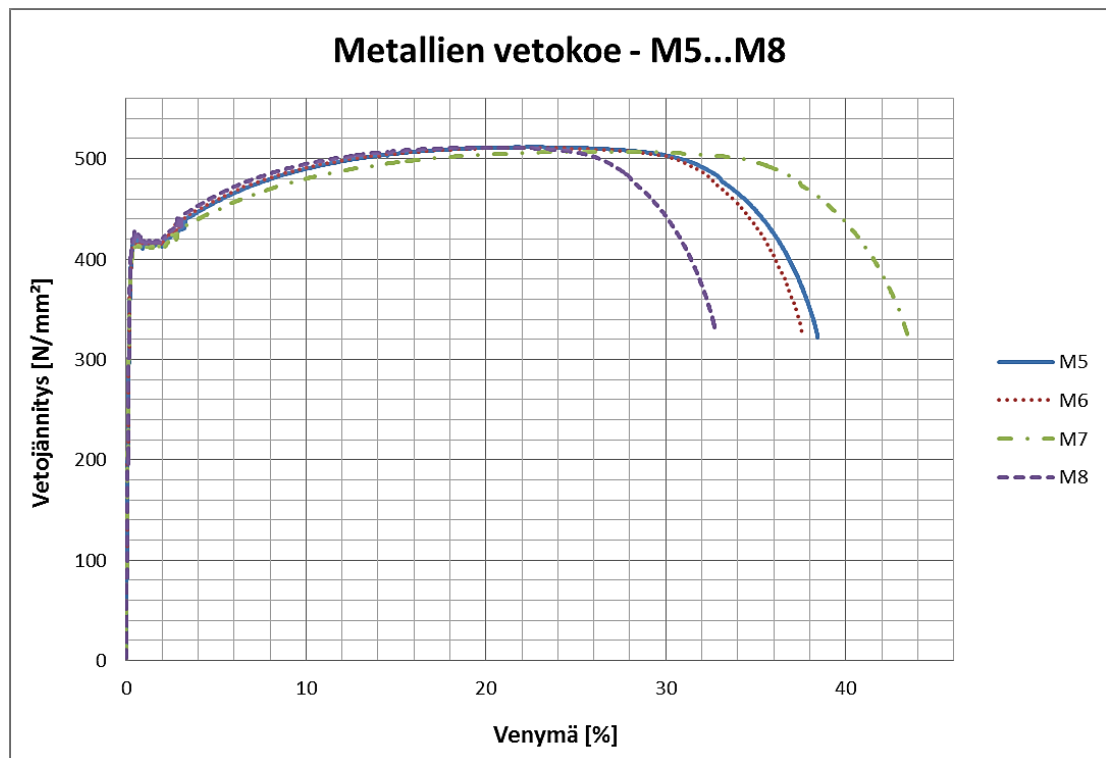
Kuva 5.5. Vetokokeiden M1...M4 jännitys-venymäkuvaajat venymäalueelta 0 – 1,0 %.

Vetokokeiden M5...M8 tulokset

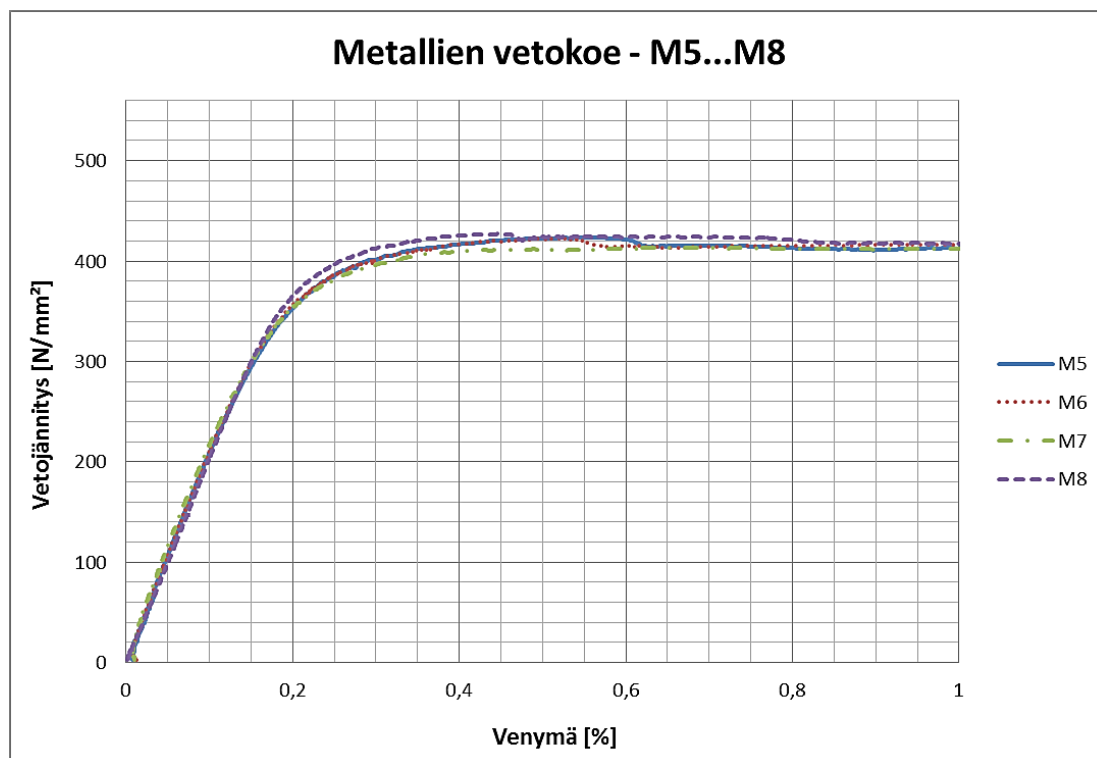
Taulukko 5.6. Vetokokeiden M5...M8 tulokset.

Tunnus	a [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	E [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]
M5	6,029	13,17	79,37	204735	424	511
M6	6,018	13,04	78,44	204402	422	511
M7	6,021	12,97	78,08	203901	413	507
M8	6,019	12,96	77,99	205137	427	511
Keskiarvo	6,022	13,04	78,47	204544	421,5	510,0
Keskihajonta	0,005	0,10	0,63	523	6,0	2,0
Variaatiokerroin	0,08 %	0,77 %	0,80 %	0,26 %	1,42 %	0,39 %

Vetokokeiden M5...M8 jännitys-venymäkuvaajat on esitetty kuvissa 5.6 ja 5.7. Kuvassa 5.6 näkyy vetokokeen koko venymäalue ja kuvassa 5.7 on esitetty vetokokeiden jännitys-venymäkuvaajat venymäalueella 0 - 1,0 %.



Kuva 5.6. Vetokokeiden M5...M8 jännitys-venymäkuvaajat.



Kuva 5.7. Vetokokeiden M5...M8 jännitys-venymäkuvaajat venymäalueelta 0 – 1,0 %.

Vetokokeiden M1...M8 tulokset

Taulukossa 5.7 on laskettu kaikkien koekappaleiden M1...M8 tulosten keskiarvot, keskihajonnat ja variaatiokertoimet.

Taulukko 5.7. Vetokokeiden M1...M8 tulokset.

Tunnus	a [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	E [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]
Keskiarvo	6,024	13,001	78,31	205803	414,5	499,9
Keskihajonta	0,009	0,083	0,53	2289	9,4	11,5
Variaatiokerroin	0,15 %	0,64 %	0,68 %	1,11 %	2,27 %	2,30 %

Vetokokeiden tulosten arviointi ja vertailu ainestodistusten arvoihin

Vetokoesarjojen M1...M4 ja M5...M8 tulokset eroavat toisistaan selkeästi, mikä viittaa siihen, että koesarjojen kappaleet ovat peräisin eri materiaalieristä. Aineodistusten mukaan koekuormituksissa käytettyjen C-paalujen materiaaliominaisuudet olivat seuraavat:

Tunnus	Ylempi myötöraja R_{eH}	Murtolujuus R_m
Materiaali 1	436 MPa	534 MPa
Materiaali 2	428 MPa	508 MPa
Keskiarvo	432 MPa	521 MPa

Aineodistusten ja koetulosten mukaisia arvoja vertaamalla näyttäisi, että koesarja M1...M4 vastaa materiaalia 2 ja koesarja M5...M8 materiaalia 1.

Vertaamalla ainestodistusten mukaisia, työstämättömän teräksen, arvoja koetuloksista saatuihin arvoihin, voidaan arvioida lujuuden menetystä, joka tapahtuu C-paalun valmistuksessa. Kun verrataan ainestodistusten ylemmän myötörajan keskiarvoa 432 MPa koesarjojen ylemmän myötörajan keskiarvoon 414,5 MPa saadaan keskimääräiseksi ylemmän myötörajan pienenemiseksi

$$\left(1 - \frac{414,5 \text{ MPa}}{432 \text{ MPa}}\right) \times 100 \% = 4,051 \%$$

Samalla tavalla laskettuna saadaan murtolujuuden menetykseksi 4,050 %, joka on lähes sama kuin ylemmän myötörajan alenema. Tämän perusteella voidaan arvioida, että teräs menettää n. 4 % sekä ylemmästä myötörajastaan että murtolujuudestaan C-paalun valmistuksessa teräslevyjen särmäyksen aikana.

Vertaamalla taulukon 5.7 arvoja taulukossa 2.3 esitettyihin standardin EN 1993-1-1 ominaisarvoihin huomataan, että koetulosten perusteella saadut ylemmän myötörajan ja murtolujuuden arvot poikkeavat huomattavasti niitä vastaavista ominaisarvoista:

Mekaaninen ominaisuus	Koetulosten keskiarvo	SFS-EN 1993-1-1	Poikkeama
Ylempi myötöraja R_{eH}	414,5 MPa	355 MPa	+16,76 %
Murtolujuus R_m	499,9 MPa	470 MPa	+6,36 %
Kimmokerroin E	205,8 GPa	210 GPa	-2,00 %

Ylemmän myötörajan ja murtolujuuden poikkeamat ovat kuitenkin suunnittelun kannalta varmalla puolella. Kokeellisesti määritetty kimmokerroin on pienempi kuin sitä vastaava ominaisarvo, jolloin ominaisarvolla lasketut nurjahdustehtävät antavat hieman todellista suurempia kestävyysarvoja.

5.3 Lyhyen C-paalun puristuskoe

5.3.1 Koejärjestelyt

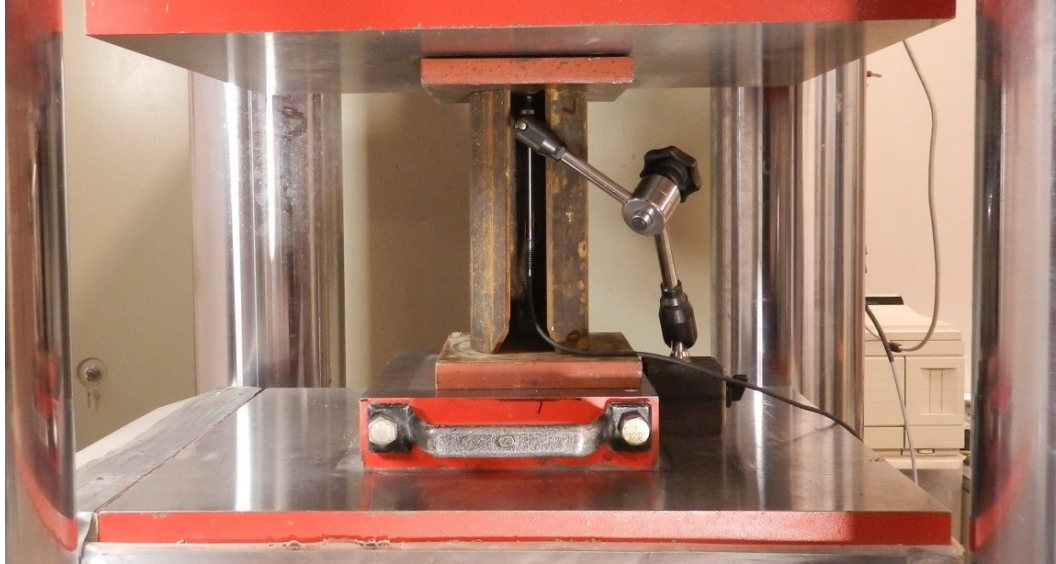
C-paalun varsi- ja kärkiosan puristuskestävyyttä tutkittiin kokeellisesti puristamalla koekappaleita keskeisesti sähköhydraulisella aineenkoetuskoneella. Tavoitteena oli määrittää C-paalun varren ja kärjen myötö- ja murtokuorma keskeisessä puristuksessa sekä tutkia C-paalun kärjen viisteiden ja reikien vaikutusta puristuskestävyyteen.

Koekappaleet

Puristuskokeita tehtiin 200 mm pitkille C-paalun osille yhteensä kuusi kappaletta: 3 koetta paalun varsiosalle (P1, P2 ja P3) ja 3 koetta paalun kärkiosalle (Pa1, Pa2 ja Pa3). Varsiosan kappaleet katkaistiin satunnaisesti käytettävissä olevista C-paaluista. Kärkiosat katkaistiin alapaalujen viistetystä ja rei'itetyistä päistä (kuva 2.7). Kaikki koekappaleet punnittiin ja mitattiin ennen koekuormitusta. Koekappaleiden mittatiedot on esitetty liitteessä 5.

Kuormitus- ja mittausjärjestelyt

Puristuskolaitteistona käytettiin sähköhydraulista aineenkoetuslaitetta RK Toni Technik, jonka puristuskapasiteetti on 5000 kN. Koekappaleet asetettiin kuvan 5.8 mukaisesti puristuskolaitteistoon teräslevyjen väliin. Puristuskokeessa mitattiin voimaa sekä koekappaleen kokoonpuristumaa C-paalun sisälle keskeisesti asetetulla induktiivisella siirtymäanturilla.



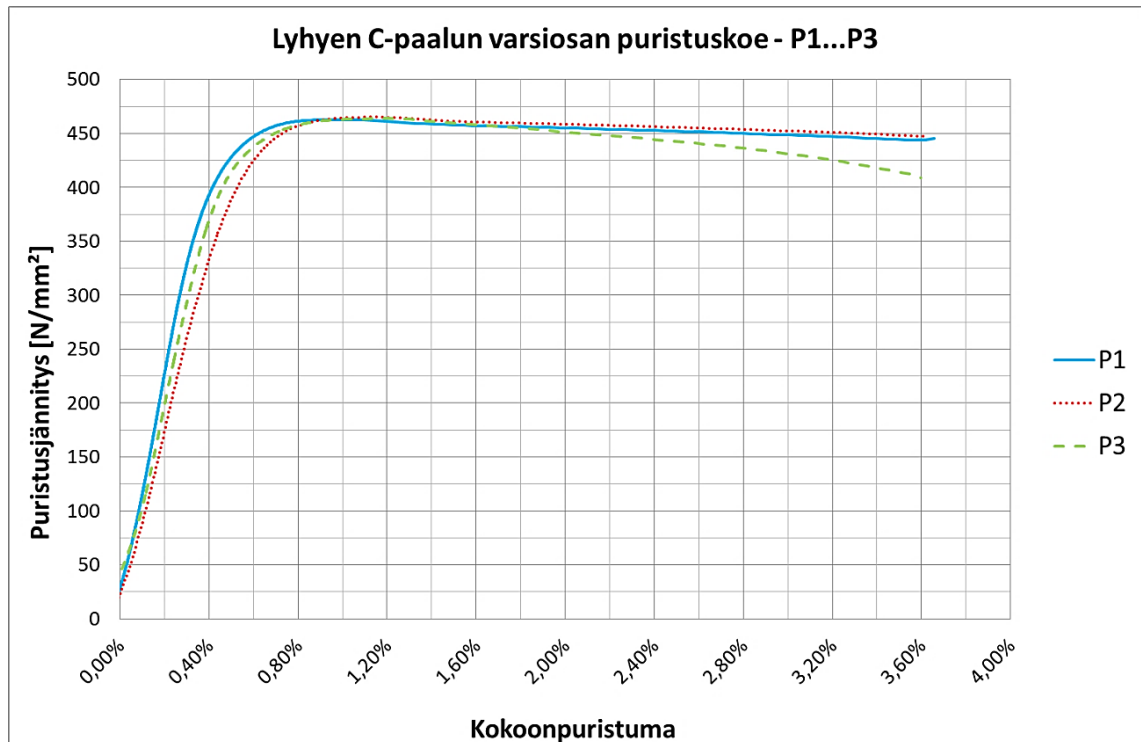
Kuva 5.8. Puristuskolaitteistoon asetettu koekappale (kärkiosa) ja siirtymäanturi.

5.3.2 Mittaustulokset ja niiden arviointi

Koekappaleita puristettiin kappaleen myötäämiseen saakka ja pysäytettiin kokoonpuristuman ollessa 7-8 mm (3,5–4,0 %). Kuormitusnopeus oli n. 114 kN/min. Kokeissa havaittiin erilaisia kimmottoman alueen vääristymisnurjahdusmuotoja. Osa koekappaleiden hahloista lähti myötörajan ylittyessä sulkeutumaan ja osa avautumaan. Tuloksena saatiin suurin puristuskuorma sekä voima-siirtymäkuvaaja, josta voidaan arvioida myötökuorman suuruutta. Voima-siirtymäkuvaajat on muutettu jännitys-muodonmuutoskuvaajiksi jakamalla puristava voima koekappaleen määrävällä poikkipinta-alalla ja kokoonpuristuma koekappaleen alkuperäisellä pituudella. Määrävä poikkipinta-ala on varsiosan kappaleilla katkohitsien välissä oleva poikkipinta-ala A_p ja kärkiosilla reikien kohdalla oleva poikkipinta-ala $A_{p,r}$. Murto- ja myötöjännityksiä arvioidessa on käytetty mitattuja poikkipinta-aloja.

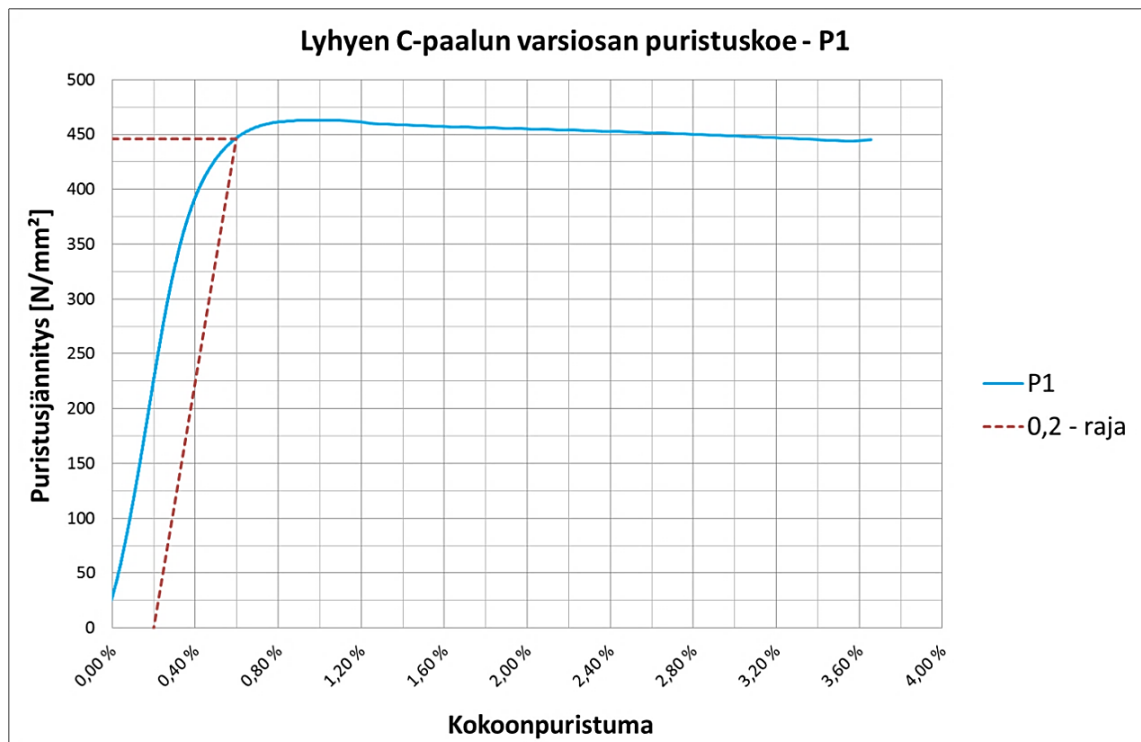
Lyhyen C-paalun varsiosan puristuskokeiden P1...P3 tulokset

Varsiosan koekappaleiden P1...P3 jännitys-muodonmuutoskuvaajat on esitetty kuvassa 5.9. Kuvasta 5.9 voidaan huomata, että tulokset ovat hyvin yhdenmukaiset kaikilla koekappaleilla.



Kuva 5.9. Lyhyen C-paalun varsiosan puristuskokeiden P1...P3 jännitys-muodonmuutoskuvaajat.

Koekappaleiden jännitys-muodonmuutoskuvaajasta on vaikea erottaa selkeää jännityksen arvoa, jolla myötääminen alkaa. Tästä johtuen koekappaleiden myötöjännitys on arvioitu 0,2-rajaa soveltamalla. Tällöin myötöjännityksen arvo luetaan kuvan 5.10 mukaisesti jännitys-muodonmuutoskuvaajan ja 0,2 % kokoonpuristuman kohdalta piirretyn suoran kohtauspisteestä. 0,2 % kokoonpuristuman kohdalta piirretyn suoran kulmakerroin on valittu siten, että se vastaa jännitys-muodonmuutoskuvaajan lineaarisen osan kulmakerrointa.



Kuva 5.10. Myötöjännityksen arvioiminen 0,2-rajaa soveltamalla.

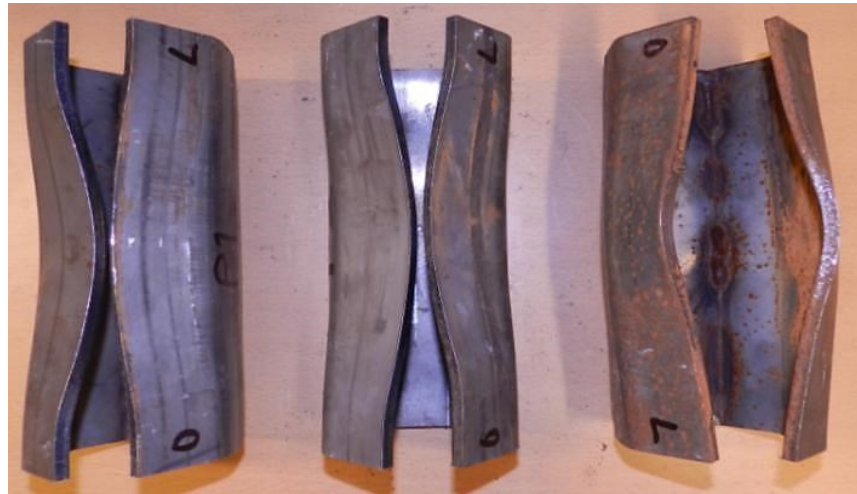
Kokoonpuristuman arvosta 0,2 % piirretyn suoran kulmakerroin vastaa jännitys-muodonmuutoskuvaajan pisteiden, joissa puristuskuorma on 200 kN ja 400 kN, välille piirretyn suoran kulmakerrointa kaikkien koekappaleiden myötöjännitystä arvioidessa. Soveltamalla 0,2-rajaa arvioidut koekappaleiden myötöjännityksen ja myötökuorman arvot on esitetty taulukossa 5.8.

Taulukko 5.8. Lyhyen paalin varsiosan puristuskokeiden P1...P3 tulokset.

Tunnus	A_p [mm ²]	Myötökuorma [kN]	Myötöjännitys [N/mm ²]	Murtokuorma [kN]	Murtöjännitys [N/mm ²]
P1	1510,4	673,6	446,0	705,0	462,9
P2	1507,2	673,7	447,0	701,0	465,1
P3	1511,6	674,2	446,0	701,0	463,7
Keskiarvo	1509,7	673,8	446,3	702,3	463,9
Keskihajonta	2,3	0,3	0,6	2,3	1,1
Variaatiokerroin	0,15 %	0,04 %	0,13 %	0,33 %	0,24 %

Kuvassa 5.11 ovat koekappaleet järjestyksessä vasemmalta oikealle P1, P2 ja P3 koe-kuormituksen jälkeen. Kuvasta nähdään, että koekappaleet P1 ja P2 ovat myötäneet siten, että hahlo sulkeutui kun taas koekappale P3 avautui hahlon kohdalta. Koekappaleiden kimmottomalla alueella tapahtuneet muodonmuutokset ovat samankaltaisia kuin aiemmin kappaleessa 4.2.1 esitetyt vääristymisnurjahdusmuodot. Myötöamisen jälkeen tapahtuvaa hahlon sulkeutumista tai aukeamista ei ole havaittavissa taulukon 5.8 arvoista. Sen sijaan jännitys-muodonmuutoskuvaajassa (kuva 5.9) koekappaleen P3 kuvaaja poikkeaa P1:n ja P2:n kuvaajista maksimijännityksen jälkeen, mikä voi selittyä erilaisista kimmottoman alueen vääristymisnurjahdusmuodoista. Missään varsiosan koekappa-

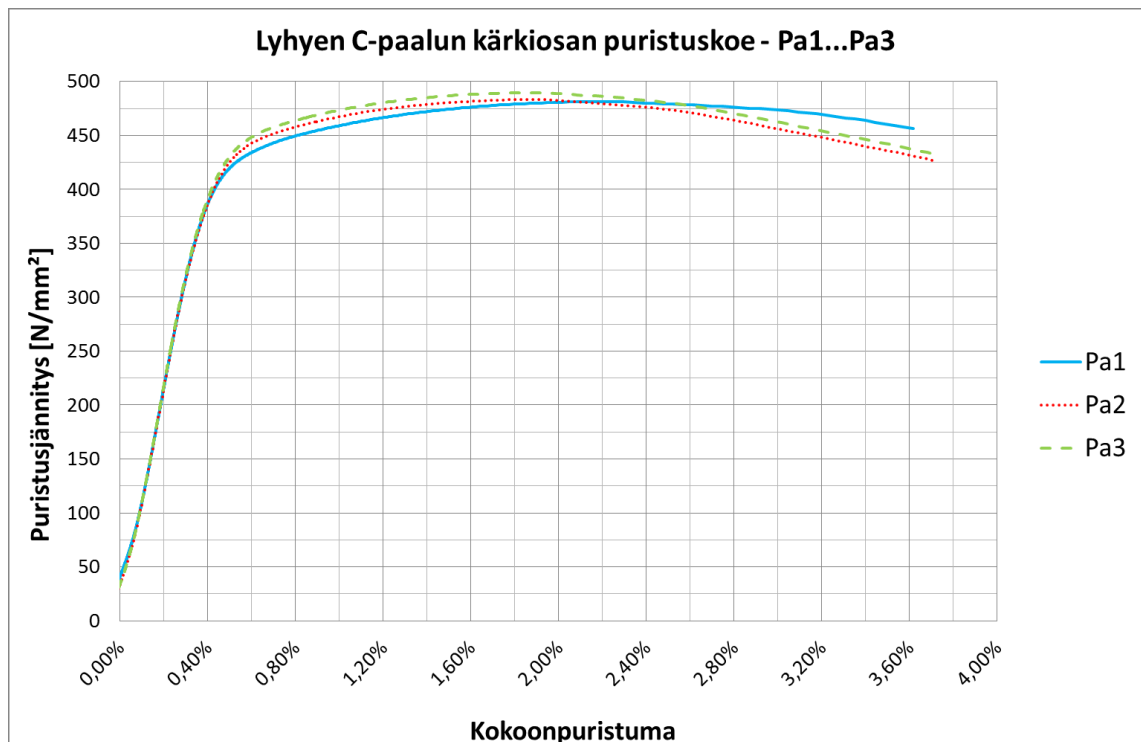
leiden pituussuuntaisissa katkohitsisaumoissa ei havaittu puristuskokeen aikana muodonmuutoksia.



Kuva 5.11. Koekappaleet P1, P2 ja P3 kuormituksen jälkeen vasemmalta oikealle.

Lyhyen C-paalun kärkiosan puristuskokeiden Pa1...Pa3 tulokset

Kärkiosan koekappaleiden Pa1...Pa3 jännitys-muodonmuutoskuvaajat on esitetty kuvassa 5.12. Varsikappaleiden tavoin myös kärkikappaleiden puristuskokeista saadut jännitys-venymäkuvaajat Pa1...Pa3 ovat keskenään hyvin samankaltaisia.



Kuva 5.12. Lyhyen C-paalun kärkiosan puristuskokeiden Pa1...Pa3 jännitys-muodonmuutoskuvaajat.

Taulukossa 5.9 on esitetty kärkiosan puristuskokeiden myötö- ja murtokuormat sekä myötö- ja murtojännitykset. Myötökuormat ja -jännitykset on laskettu 0,2 –rajaa soveltamalla kuten varsiosan kappaleillekin.

Taulukko 5.9. Lyhyen paalun kärkiosan puristuskokeiden Pa1...Pa3 tulokset.

Tunnus	$A_{p,r}$ [mm ²]	Myötökuorma [kN]	Myötöjännitys [N/mm ²]	Murtokuorma [kN]	Murtojännitys [N/mm ²]
Pa1	1381,0	600,7	435,0	664,9	481,5
Pa2	1363,7	605,5	444,0	659,0	483,2
Pa3	1358,2	608,5	448,0	665,0	489,6
Keskiarvo	1367,6	604,9	442,3	663,0	484,8
Keskihajonta	11,9	3,9	6,7	3,4	4,3
Variaatiokerroin	0,87 %	0,65 %	1,51 %	0,52 %	0,88 %

Kuvassa 5.13 ovat kärkiosat järjestyksessä vasemmalta oikealle Pa1, Pa2 ja Pa3 koe-kuormituksen jälkeen. Kuvasta nähdään, että koekappaleet Pa1 ja Pa2 ovat myötäneet siten, että toinen hahlon viereisistä särmistä on sulkeutunut ja toinen auennut, kun taas koekappaleessa Pa3 molemmat hahlon viereiset särmät ovat sulkeutuneet.



Kuva 5.13. Koekappaleet Pa1, Pa2 ja Pa3 kuormituksen jälkeen vasemmalta oikealle.

Ennen poikkileikkauksen hahlon sulkeutumista tai avautumista kaikkien koekappaleiden reiät alkoivat painua kiinni. Koekappaleiden Pa1 ja Pa2 pituussuuntaisen katkohit-sisauman viereiset särmät aukesivat hitsien väliltä. Kuvassa 5.14 on havaittavissa pysy-väksi muodonmuutokseksi jäänyt osittain kiinni puristunut reikä sekä hitsien välistä auenneet särmät. Viisteiden kohdalla ei havaittu muodonmuutoksia.



Kuva 5.14. Koekappale Pa1 kuormituksen jälkeen.

Kärkiosan viisteiden ja reikien vaikutus lyhyen kappaleen puristuskestävyyteen

Varsiosan ja kärkiosan taulukoissa 5.8 ja 5.9 esitettyjen tulosten keskiarvot on esitetty taulukossa 5.10. Taulukossa 5.10 on laskettu tulosten keskiarvojen välinen poikkeama sekä suhteellinen ero verrattuna varsiosan tuloksiin.

Taulukko 5.10. Koetulosten P1...P3 ja Pa1...Pa3 vertailu.

	Varsiosat P1...P3	Kärkiosat Pa1...Pa3	Poikkeama	Suhteellinen ero
Myötökuorma [kN]	673,8	604,9	-68,9	-10,2 %
Myötöjännitys [N/mm ²]	446,3	442,3	-4,0	-0,9 %
Murtokuorma [kN]	702,3	663,0	-39,4	-5,6 %
Murtojännitys [N/mm ²]	463,9	484,8	+20,9	+4,5 %

Taulukon 5.10 arvoista nähdään, että kärkiosan kappaleet alkoivat myötää 10,2 % pienemmällä puristukuorman arvoilla kuin varsiosan kappaleet. Kärkiosien nettopinta-alat olivat 9,4 % pienemmät suhteessa kärkiosiin. Myötökuormien keskiarvojen suhteellinen ero on lähellä nettopinta-alojen suhteellista eroa, minkä perusteella voidaan arvioida kärkiosan reikien heikentävän lyhyen paalun puristuskestävyyttä n. 10 %. Taulukon 5.10 myötö- ja murtojännitysten tulosten vertailussa on huomioitava, että ne on laskettu käyttämällä puristuskestävyyden kannalta määrääviä koekappaleiden nettopinta-aloja. Tästä johtuen samasta materiaalista valmistettujen koekappaleiden välillä ei ole suurta eroa myötöjännitysten välillä.

Kärkiosat saavuttivat keskimäärin 4,5 % korkeamman murtojännityksen kuin varsiosat, mutta keskimääräiset murtokuormat olivat 5,6 % pienemmät kuin varsiosan koekappaleilla. Kärkiosien varsiosia korkeammat murtojännitykset voivat selittyä sillä, että reikien puristuessa kiinni jännityksien laskennassa käytetty nettopinta-ala $A_{p,r}$ ei pidä enää paikkaansa.

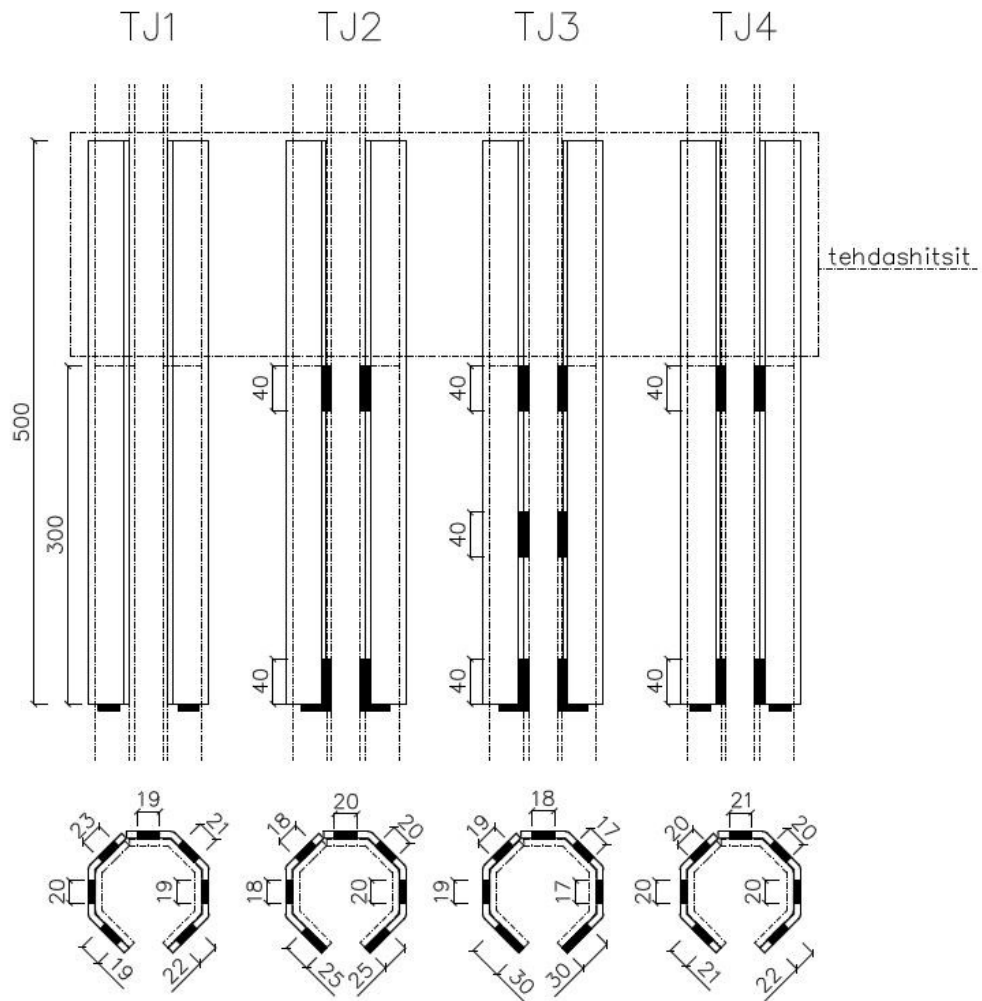
5.4 Taivutuskoe

5.4.1 Koejärjestelyt

C-paalun taivutuskestävyyttä ja taivutusjäykkyyttä tutkittiin kokeellisesti taivuttamalla jatkamattomia sekä jatkettuja koekappaleita standardin EN 1993-5 kansallisen liitteen kohdassa 7.4.2 esitetyn jatkettun paalun taivutuskokeen mukaisesti. Taivutuskokeiden päätavoitteena oli tutkia toteutuvatko standardin EN 1993-5 kansallisessa liitteessä jatkettulle paalulle asetetut taivutuskestävyys- ja taivutusjäykkyyksivaatimukset. Vaatimusten mukaan tukipaalun jatkoksen taivutuskestävyyden ominaisarvon $M_{p,jatkos}$ tulee olla suurempi tai yhtä suuri kuin paalun jatkamattoman osan ominaisarvon M_p . Jatkoksen taivutusjäykkyyden EI_{jatkos} tulee olla vähintään 75 % jatkamattoman osan taivutusjäykkyydestä taivutusmomentin ollessa välillä $0,3 \dots 0,8 \times M_p$. Tavoitteena oli myös tutkia miten eri tavalla hitsatut holkkijatkokset käyttäytyvät taivutuksessa. Koekuormituksissa paalujen taivutuskestävyyttä ja -jäykkyyttä tutkittiin ainoastaan C-paalujen taivutuskestävyyden suhteen heikoimmassa suunnassa (katso kuva 4.16). (NA SFS-EN 1993-5, kohta 7.4.2).

Koekappaleet

Taivutuskokeita varten katkottiin kolme 4400 mm pitkää jatkamatonta koekappaletta (T1...T3) sekä valmistettiin neljä 4400 mm pitkää jatkettua koekappaletta (TJ1...TJ4). Jatketut koekappaleet valmistettiin käyttämällä 2200 mm pitkiä jatkamattomia paaluja sekä 2200 mm pitkiä jatkospaaluja, joiden päissä oli tehtaalla hitsatut holkkijatkokset. Jatketuttujen koekappaleiden holkkijatkokset hitsattiin eri tavoilla kuvan 5.15 mukaisesti. Alun perin tarkoituksena oli hitsata jatkos särmien kohdalta kiinni käyttämällä 10 mm pituisia katkohitsejä, mutta käytännössä näin lyhyen katkohitsin hitsaaminen osoittautui vaikeaksi. 10 mm katkohitsin sijaan päädyttiin hitsaamaan jatkokset särmien kohdalta kiinni n. 20 mm katkohitsejä käyttäen. Paalun pituussuunnassa koekappaleen TJ1 jatkosta ei hitsattu kiinni. Koekappaleissa TJ2...TJ4 käytettiin kuvan 5.15 mukaisia pituussuuntaisia katkohitsejä (a-mitta 4 mm). Koekappaleiden TJ1...TJ4 valmistuksessa käytettyjen jatkospaalujen holkkijatkosten tehdashitsit on dokumentoitu koekappaleiden mittatiedot sisältävässä liitteessä 6. Holkkijatkokset oli hitsattu tehtaalla tiheämpiä ja pidempiä katkohitsejä käyttäen.



Kuva 5.15. Koekappaleiden TJ1...TJ4 holkkijatkoksen hitsit (a-mitta 4 mm).

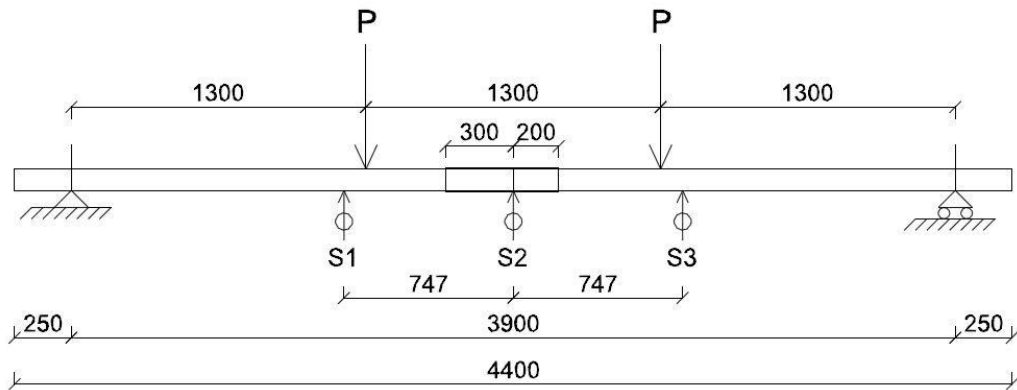
Kaikkien koekappaleiden päihin hitsattiin kuvan 5.16 mukaiset 80x80x8 mm teräslevyt 250 mm etäisyydelle levyn keskeltä paalun päähän mitattuna. Teräslevyjen alareuna asetettiin C-paalun hahlon kanssa samalle tasolle. Teräslevyjen avulla pyrittiin minimoimaan tuella tapahtuvia paikallisia muodonmuutoksia.



Kuva 5.16. Koekappaleen kylkiin hitsatut teräslevyt sekä paalun pään tuki.

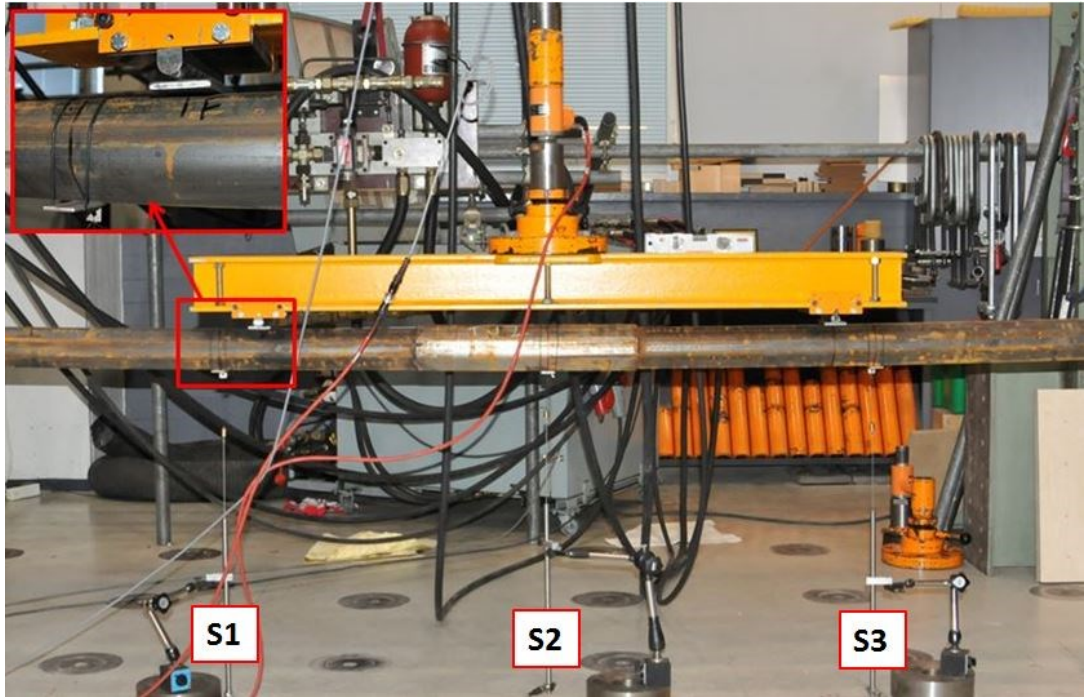
Kuormitus- ja mittausjärjestelyt

Kuvassa 5.17 on esitetty taivutuskokeen kuormitus- ja mittausjärjestelyt, jotka täyttävät standardin EN 1993-5 kansallisessa liitteessä esitetyt jatkettun paalun taivutuskokeen vaatimukset (NA SFS-EN 1993-5, kuva 7.4.1/1). Koekappaleet tuettiin päistään kuvan 5.16 ja 5.17 mukaisesti siten, että molemmissa päissä kiertymä oli vapautettu, mutta vääntyminen estetty. Vasemman tuen vaakasiirtymät oli estetty, mutta oikean puoleisen tuen siirtymä paalun pituussuunnassa oli vapautettu laakeroinnin avulla.



Kuva 5.17. Taivutuskokeen kuormitus- ja mittausjärjestelyt.

Koekappaleita taivutettiin kahdella pistekuormalla P kuvan 5.17 mukaisesti. Kuormituslaitteistona käytettiin koehallin kuormituskehän hydraulista kuormitussylinteriä ja voima-anturia Bofors KSG-4. Sylinterin kuorma jaettiin kahdeksi pistekuormaksi kuvan 5.18 mukaisesti I-palkin sekä kahden laakerin avulla. Laakerin ja C-paalun yläpinnan välissä oli vapaana oleva 8 mm paksuinen teräslevy. Koekappaleen taipuma mitattiin kolmesta pisteestä (S1...S3) C-paalun alareunaan asetetuilla induktiivisilla siirtymäantureilla. Siirtymäanturit kiinnitettiin C-paalujen alareunaan alumiinilevyn ja kuminauhan avulla (kuva 5.18).



Kuva 5.18. Taivutuskokeen kuormituslaitteisto ja taipuman mittauspisteet.

5.4.2 Mittaustulokset ja niiden arviointi

Kaikkia koekappaleita kuormitettiin myötäämiseen tai jatkoksen murtoon asti. Kuormitusnopeus oli n. 2 kN/min pistekuormaa kohti. Koekappaleen myötäämisen jälkeen osa kokeista jouduttiin pysäyttämään ennen varsinaista murtoa suuren taipuman vuoksi. Keskeytetyissä taivutuskokeissa koekappaleet saavuttivat kuitenkin taivutuskestävyyden maksimiarvon. Keskeytettyjen kokeiden keskimmäisen siirtymäanturin mittausalue lopui keskitaipuman ollessa n. 200 mm.

Taivutuskestävyyden arviointi

Koetulosten perusteella arvioidut koekappaleiden taivutuskestävyydet on määritetty laskemalla mittauspisteiden välillä myötöhetkellä vaikuttaneen taivutusmomentin suuruus. Laskelmissa on oletettu, että tunkin pistekuorma on jakautunut tasan kuormituspisteille, jolloin voidaan kuvan 5.17 mukaisesta tilanteesta laskea kahden pistekuorman aiheuttaman momentin suuruudeksi

$$M_{\text{pistekuormat}} = P \times 1300 \text{ mm}. \quad (5.2)$$

Paalun omasta painosta aiheutuva taivutusmomentti on mittauspisteiden S1 ja S3 välillä keskimäärin 0,2 kNm, joka on otettu huomioon taivutuskestävyyksiä laskettaessa.

Taivutusjäykkyyden arviointi

Taivutusjäykkyys EI lasketaan standardin EN 1993-5 kansallisen liitteen mukaan kaavasta

$$EI = \frac{M \cdot l^2}{8 \cdot \delta}, \quad (5.3)$$

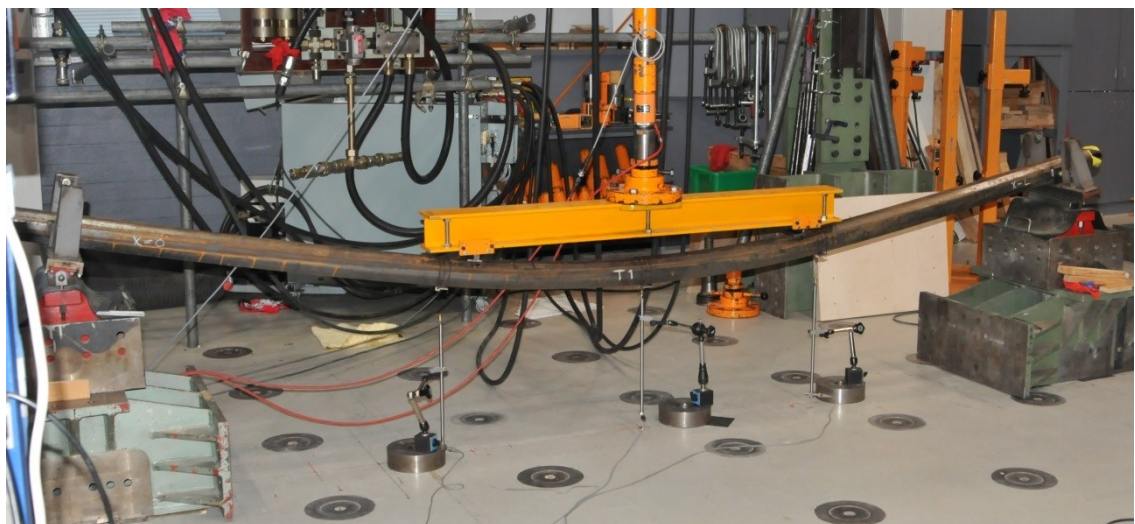
missä M on mittauspisteiden $S1 - S3$ välillä vaikuttava taivutusmomentti, l on mittauspisteiden $S1$ ja $S3$ välinen etäisyys ja δ on paalun taipuma mittauspisteiden välillä (NA SFS-EN 1995-5, kohta 7.4.2). Mittauspisteiden välinen taipuma voidaan laskea kaavasta

$$\delta = S2 - \frac{S1+S2}{2}. \quad (5.4)$$

Taivutusjäykkyyden laskentakaavassa (5.3) huomioidaan ainoastaan kuormituksesta aiheutuva taivutusmomentti ja mittauspisteiden välinen taipuma.

C-paalujen taivutuskokeiden T1...T3 tulokset

Kaikki taivutuskokeet T1...T3 olivat keskenään hyvin samankaltaisia. Koekappaleet saavuttivat taivutuskestävyyden maksimiarvonsa ja alkoivat myötää kuvan 5.19 mukaisesti. Kokeet keskeytettiin mittauspisteen $S2$ mittausalueen loputtua keskitaipuman ollessa 190 – 210 mm. Koekappaleiden pituussuuntaisissa hitsaussaumoissa ei ollut havaittavissa muodonmuutoksia kokeiden jälkeen.



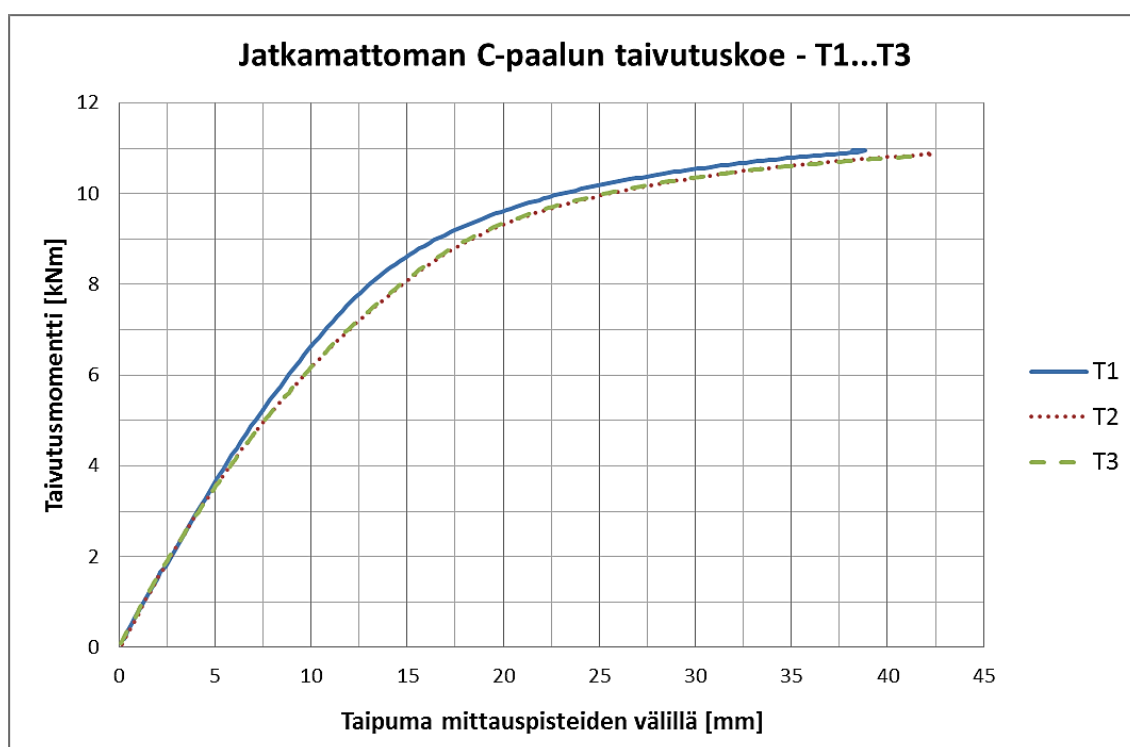
Kuva 5.19. Myötörajan ylittänyt taivutuskoeappale T1.

C-paalujen taivutuskokeiden pistekuormien maksimiarvot ja niiden avulla laskettujen taivutuskestävyyksien arvot on esitetty taulukossa 5.11. Taivutuskestävyydet on laskettu kaavalla (5.2) ja niihin on lisätty oman painon aiheuttama taivutusmomentti 0,2 kNm. Kokeiden perusteella C-paalujen taivutuskestävyyksien keskiarvoksi saatiin 11,355 kNm.

Taulukko 5.11. Taivutuskokeiden T1...T3 tulokset.

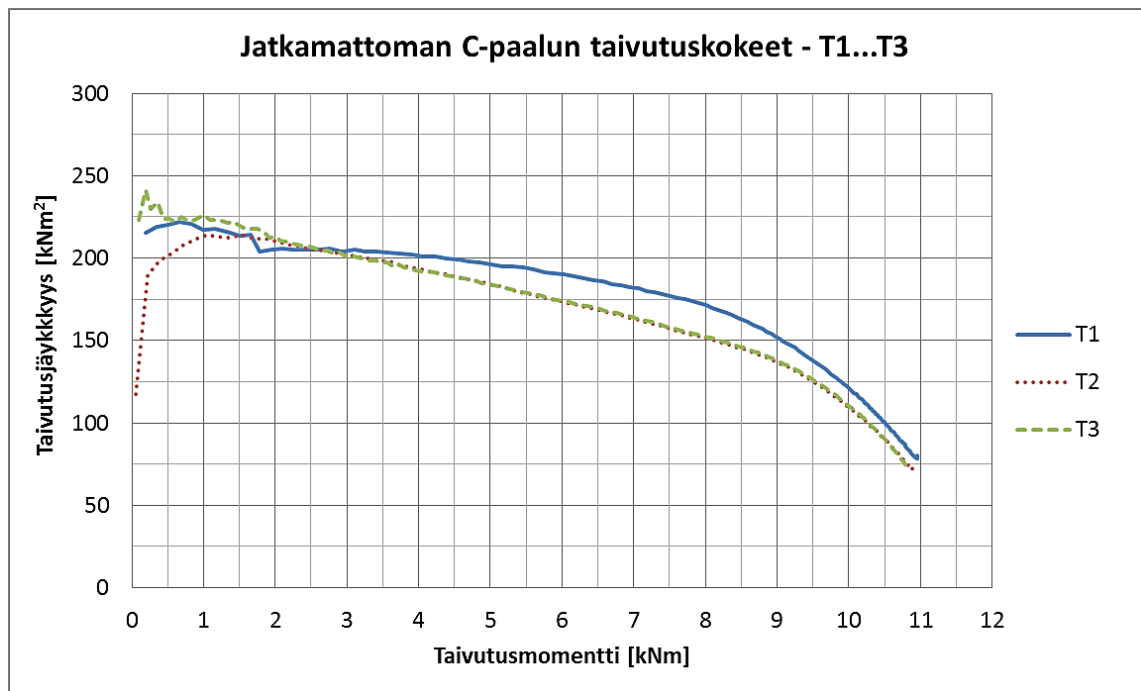
Tunnus	Pistekuorman maksimiarvo [kN]	Taivutuskestävyys [kNm]
T1	8,652	11,448
T2	8,523	11,279
T3	8,568	11,338
Keskiarvo	8,581	11,355
Keskihajonta	0,066	0,086
Variaatiokerroin	0,77 %	0,75 %

Kuvassa 5.20 on esitetty taivutuskokeiden T1...T3 kuvaajat, joissa pystyakselilla on pistekuormien aiheuttama taivutusmomentti ja vaaka-akselilla on mittauspisteiden välinen taipuma δ , joka on laskettu kaavaa (5.4) käyttäen.



Kuva 5.20. Taivutuskokeiden T1...T3 taivutusmomentti-taipumakuvaajat.

Kuvasta 5.20 nähdään, että koekappaleiden taivutusmomentti-taipumakuvaajat ovat epälineaarisia. Epälineaarisuudesta johtuen koekappaleiden taivutusjäykkyyksien laskeminen kaavan (5.3) avulla antaa eri tulokset laskentapisteestä riippuen. Koekappaleiden T1...T3 taivutusjäykkyyydet pistekuormien aiheuttaman taivutusmomentin suhteen on esitetty kuvassa 5.21.



Kuva 5.21. Taivutuskokeiden T1...T3 taivutusjäykkyys-taivutusmomenttikuvajaat.

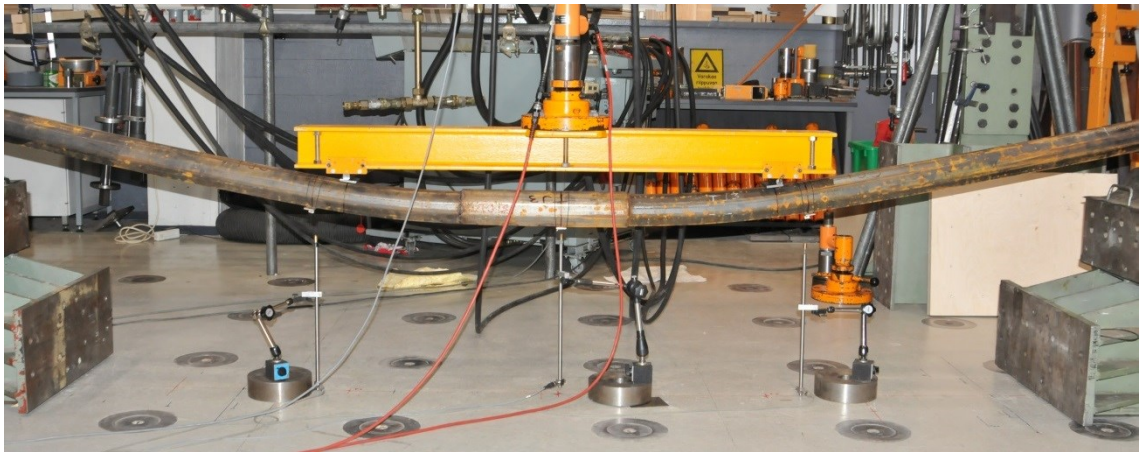
Jatkettujen C-paalujen taivutuskokeiden TJ1...TJ4 tulokset

Ensimmäinen jatkettujen C-paalujen taivutuskokeista suoritettiin koekappaleelle TJ1, jonka holkkijatkos oli hitsattu koehallilla kuvan 5.15 mukaisesti ainoastaan särmiltä. Taivutuskoe TJ1 taipui aluksi tasaisesti taivutusmomentin kasvaessa 5 kNm:iin, jonka jälkeen holkkijatkoksen sisällä oleva, koehallilla hitsatun puoleinen, C-paalun pää alkoi liukua ulos jatkoksen sisältä. Taivutuskoea jatkettiin kunnes koehallilla hitsattujen särmien alimmat hitsit murtuivat taivutusmomentin ollessa 8,693 kNm. Koekappaleen TJ1 holkkijatkoksesta ulos liukunut C-paalun pää sekä särmistä murtuneet hahlon vie-reiset katkohitsit on esitetty kuvassa 5.22.



Kuva 5.22. Taivutuskokeen TJ1 jatkos hitsien murtumisien jälkeen.

Taivutuskokeissa TJ2...TJ4 jatkokset, joissa kaikissa oli katkohitsit myös holkkijatkoksen pituussuunnassa kuvan 5.15 mukaisesti, kestivät ilman C-paalun pään ulos liukumista tai katkohitsien murtumista. Kokeet TJ2...TJ4 pysäytettiin C-paalun taivutuskokeiden T1...T3 tavoin koekappaleiden myötäämisen jälkeen keskitaipuman mittausalueen loputtua kesken. Koekappaleet TJ2...TJ4 myötivät kuvan 5.23 mukaisesti holkkijatkoksen vierestä. Kappaleiden TJ2... TJ4 holkkijatkoksissa ja niiden hitseissä sekä C-paalujen pituussuuntaisissa katkohitseissä ei ollut havaittavissa muutoksia kokeiden jälkeen.



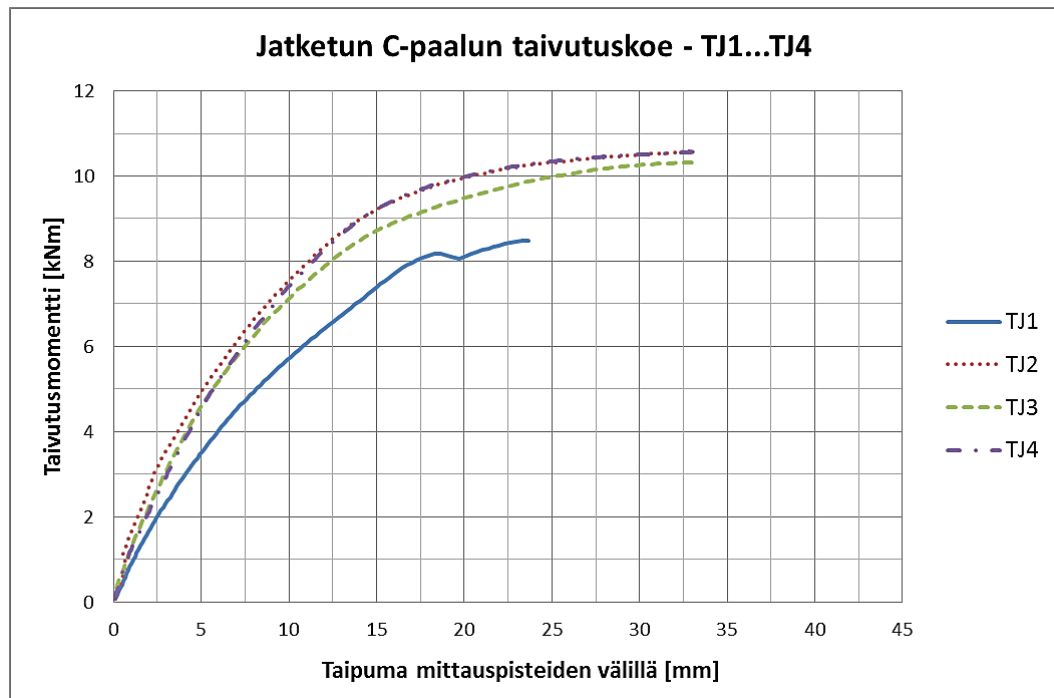
Kuva 5.23. Taivutuskoe kappale TJ3 myötäämisen jälkeen.

Jatkettujen C-paalujen taivutuskokeiden pistekuormien maksimi-arvot ja niiden avulla laskettujen taivutuskestävyyksien arvot on esitetty taulukossa 5.12. Taivutuskestävyydet on laskettu kaavalla (5.2) ja niihin on lisätty oman painon aiheuttama taivutusmomentti 0,2 kNm. Taulukon 5.12 keskiarvoissa ja -hajonnoissa sekä variaatiokertoimissa ei ole huomioitu koekappaleen TJ1 tuloksia, sillä se ei ole vertailukelpoinen koekappaleiden TJ2...TJ4 kanssa. Kokeiden perusteella koekappaleiden, joiden jatkokset kestivät, taivutuskestävyyden keskiarvoksi saatiin 10,767 kNm.

Taulukko 5.12. Taivutuskokeiden TJ1...TJ4 tulokset.

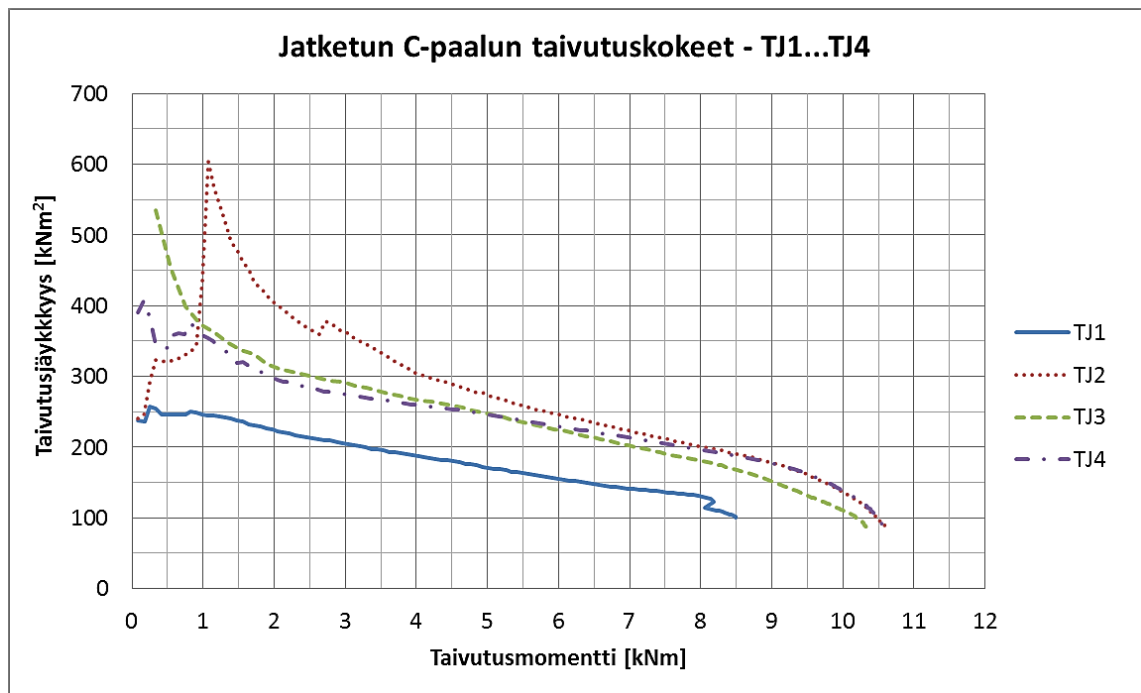
Tunnus	Pistekuorman maksimi-arvo [kN]	Taivutuskestävyys [kNm]
TJ1	6,533	8,693
TJ2	8,183	10,838
TJ3	7,974	10,566
TJ4	8,227	10,895
Keskiarvo (TJ2...TJ4)	8,128	10,767
Keskihajonta (TJ2...TJ4)	0,135	0,176
Variaatiokerroin (TJ2...TJ4)	1,67 %	1,64 %

Kuvassa 5.24 on esitetty taivutuskokeiden TJ1...TJ4 kuvaajat, joissa pystyakselilla on pistekuormien aiheuttama taivutusmomentti ja vaaka-akselilla on mittauspisteiden välinen taipuma δ , joka on laskettu kaavalla (5.4).



Kuva 5.24. Taivutuskokeiden TJ1...TJ4 taivutusmomentti-taipumakuvaajat.

Kuvasta 5.24 nähdään, että jatkettujen C-paalujen taivutusmomentti-taipumakuvaajat ovat epälineaarisia kuten jatkamattomien koekappaleiden tapauksessa. Kuvaan 5.25 on piirretty koekappaleiden taivutusjäykkyys pistekuormien aiheuttaman taivutusmomentin suhteen. Taivutusjäykkyys-taivutusmomenttikuvasta nähdään, että jatkamattomien koekappaleiden tapaan myös jatkettujen koekappaleiden taivutusjäykkyyden suuruus ei ole vakio taivutusmomentin suhteen. Kuvasta 5.24 ja 5.25 nähdään myös, että koekappaleiden TJ2...TJ4 välillä ei suurta eroa taivutuskestävyyksien eikä jäykkyyksien suhteen.



Kuva 5.25. Taivutuskokeiden TJ1...TJ4 taivutusjäykkyys-taivutusmomenttikuvaajat.

Jatkoksen vaikutus taivutuskestävyyteen ja –jäykkyyteen

Standardin EN 1993-5 kansallisen liitteen mukaan jatkettun paalun taivutuskestävyyden tulisi olla vähintään yhtä suuri kuin jatkamattoman paalun laskennallisen taivutuskestävyyden ominaisarvon. Jatkettujen koekappaleiden TJ2...TJ4 taivutuskestävyydet olivat koetulosten keskiarvojen perusteella 5,17 % pienempiä kuin jatkamattomien koekappaleiden T1...T3 taivutuskestävyydet. Joten vertaamalla jatkettujen koekappaleiden taivutuskestävyyksiä jatkamattomien koekappaleiden taivutuskestävyyksiin, ei standardin ehto toteudu jatkettujen koekappaleiden osalta. Standardin jatkettun paalun taivutuskestävyyttä koskevan ehdon toteutumista tutkitaan kohdassa 6.2, jossa jatkettun paalun taivutuskestävyyksiä verrataan jatkamattoman paalun teoreettisen taivutuskestävyyden arvoon.

Standardin EN 1993-5 kansallisen liitteen mukaan jatkettun paalun taivutusjäykkyyden tulee olla vähintään 75 % jatkamattoman paalun taivutusjäykkyydestä alueella, jossa taivutusmomentti on 30 – 80 % jatkamattoman paalun laskennallisen taivutuskestävyyden ominaisarvosta. Taulukossa 5.13 on esitetty koekappaleiden T1...T3 sekä TJ2...TJ4 kaavalla (5.3) lasketut taivutusjäykkyydet. Taivutusjäykkyydet on laskettu 10 %-yksikön välein taivutuskestävyyden arvosta. Taivutuskestävyytenä on käytetty arvoa 11,16 kNm, joka saadaan kun jatkamattomien koekappaleiden T1...T3 taivutuskestävyyksien keskiarvosta vähennetään oman painon aiheuttama taivutusmomentti.

Taulukko 5.13. Taivutuskokeiden T1...T3 ja TJ2...TJ4 taivutusjäykkyyksien vertailu.

M_z [kNm]	Taivutusjäykkyys EI [kNm ²]								$EI_{TJ2...TJ4} / EI_{T1...T3}$	Vaatimus
	T1	T2	T3	Keskiarvo T1...T3	TJ2	TJ3	TJ4	Keskiarvo TJ2...TJ4		
0,1×11,16	217,3	214,3	223,2	218,3	603,1	373,3	353,3	443,2	203,1 %	-
0,2×11,16	206,0	208,4	210,2	208,2	385,8	311,1	291,6	329,5	158,3 %	-
0,3×11,16	203,8	199,5	198,6	200,7	344,9	283,4	269,8	299,4	149,2 %	> 75 %
0,4×11,16	199,7	190,0	189,6	193,1	290,9	261,1	253,8	268,6	139,1 %	> 75 %
0,5×11,16	194,1	178,2	178,6	183,6	258,1	236,6	236,9	243,9	132,8 %	> 75 %
0,6×11,16	185,8	167,0	167,4	173,4	230,6	211,7	218,5	220,3	127,0 %	> 75 %
0,7×11,16	175,0	153,7	155,1	161,3	204,8	185,7	199,7	196,7	122,0 %	> 75 %
0,8×11,16	154,0	138,6	140,2	144,3	180,7	156,3	180,7	172,6	119,6 %	> 75 %
0,9×11,16	120,3	108,9	109,8	113,0	135,0	-	137,7	-	-	-

Taulukon 5.13 arvoista nähdään, että jatkettujen koekappaleiden taivutusjäykkyys oli suurempi kuin jatkamattomien koekappaleiden taivutusjäykkyys taivutusmomentin ollessa alueella 10 – 80 % taivutuskestävydestä. Taivutuskokeiden perusteella jatkettu C-paalut, joiden holkkijatkokset hitsataan vähintään kuvassa 5.15 esitetyn koekappaleen TJ4 tavoin, toteuttavat jatkettun paalun taivutusjäykkyyttä koskevan standardin vaatimuksen.

5.5 Nurjahduskoe

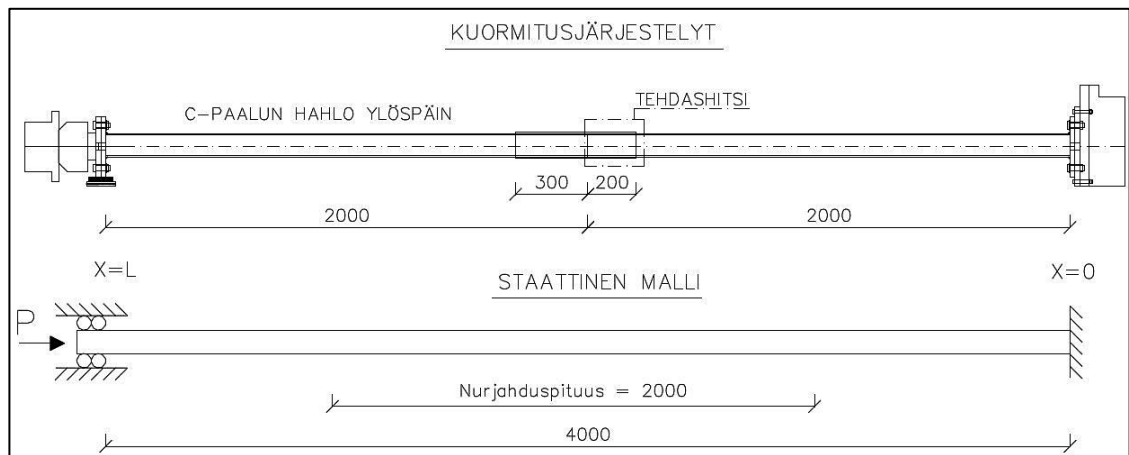
5.5.1 Koejärjestelyt

C-paalun nurjahduskestävyyttä tutkittiin kokeellisesti keskeisesti puristamalla jatkamattomia ja jatkettuja koekappaleita niiden stabiiliuden menettämiseen asti. Koekuormituksen tavoitteena oli tutkia toteutuuko aiemmin diplomityössä C-paalulle kriittiseksi nurjahdusmuodoksi määritetty taivutusvääntönurjahdus käytännössä ja tutkia jatkoksen vaikutusta C-paalun nurjahduskestävyyteen sekä –muotoon. Nurjahduskestävyyttä tutkittiin ainoastaan 4000 mm pitkällä, päistään jäykästi tuetuilla, jatketuilla ja jatkamattomilla C-paaluilla.

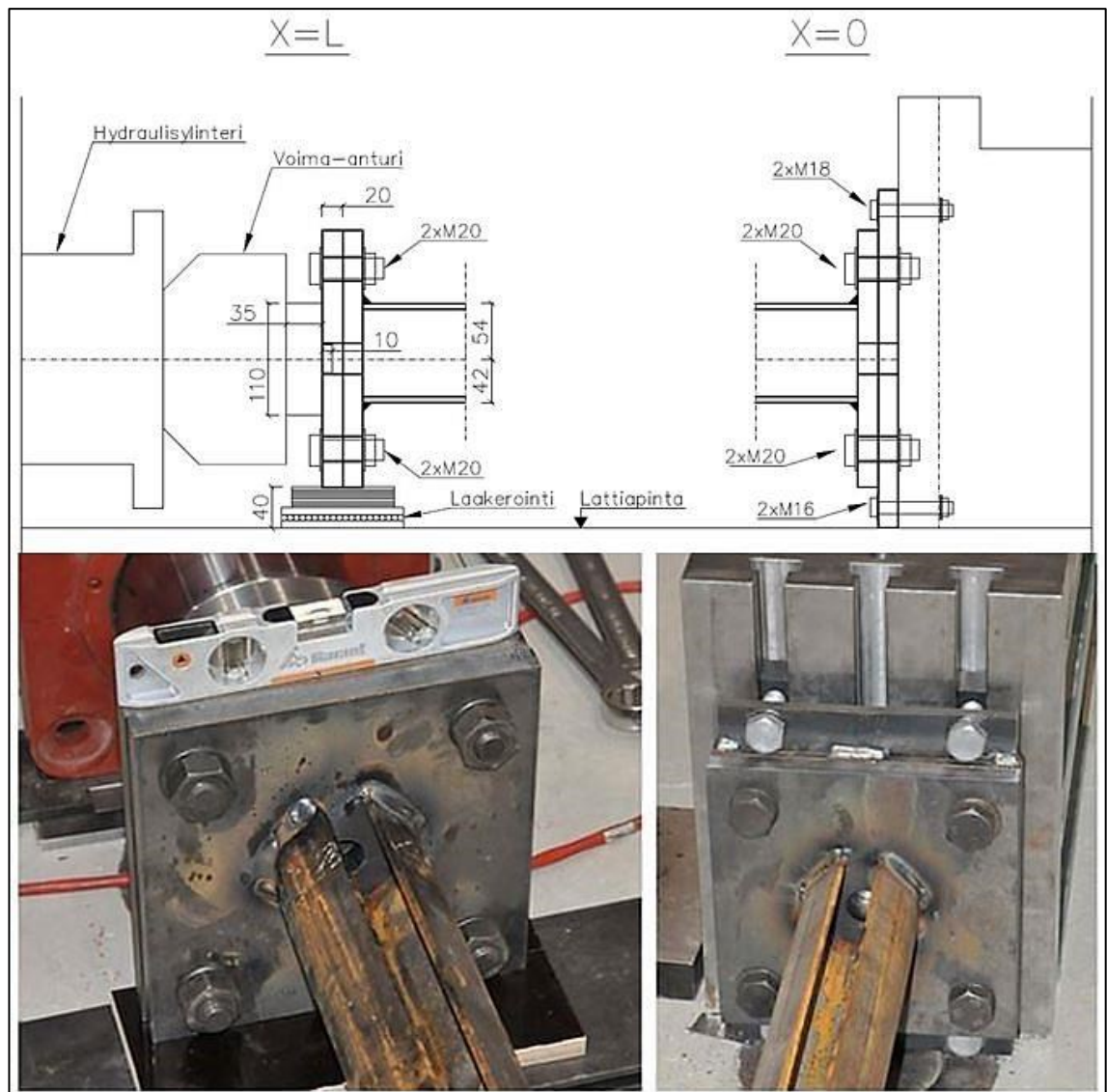
Koekappaleet

Nurjahduskokeita varten käytettävissä olevista C-paaluista katkottiin kolme 4000 mm pitkää jatkamattomia koekappaleita (N1...N3) sekä valmistettiin kolme 4000 mm pitkiä jatkettuja koekappaleita (NJ1...NJ3). Jatketut koekappaleet valmistettiin käyttämällä 2000 mm pitkiä jatkamattomia C-paaluja sekä 2000 mm pitkiä jatkospaaluja. Holkkijatkokset hitsattiin kuvan 5.26 mukaisesti (a-mitta 4 mm) neljästä kohdasta 40 mm pituisillä pienahitseillä sekä keskeltä sarmiä kuvassa esitettyjen hitsipituuksien mukaisesti. Nurjahduskokeiden holkkijatkokset hitsattiin kuten taivutuskoeekappaleen TJ4, jonka holkkijatkos kesti taivutuskokeen murtumatta ja jonka taivutusjäykkyys C-paalun heikoimmassa suunnassa oli taivutuskokeiden perusteella riittävä.

mitattuna. Koekappaleet kiinnitettiin kuormittamattomasta päästään ($x = 0$) päätyteräslevyn avulla kuvan 5.29 mukaisesti yhteensä neljällä pultilla koehallin lattiaan jäykästi kiinnitettyyn tukeen. Kuormitettavassa päädyssä ($x = L$) sijaitsevaan kuormituslaitteistoon oli kiinnitetty samanlainen teräslevy kuin koekappaleiden päätyteräslevyt. Kuormituslaitteistona käytettiin hydraulisylinteriä sekä voima-anturia Maywood U5300. Koekappaleet kiinnitettiin neljällä pultilla voima-anturissa keskeisesti sijaitsevaan teräslevyyn, jolloin koekappaleisiin saatiin kohdistettua keskeinen puristuskuorma.



Kuva 5.28. Nurjahduskokeen kuormitusjärjestelyt ja staattinen malli.



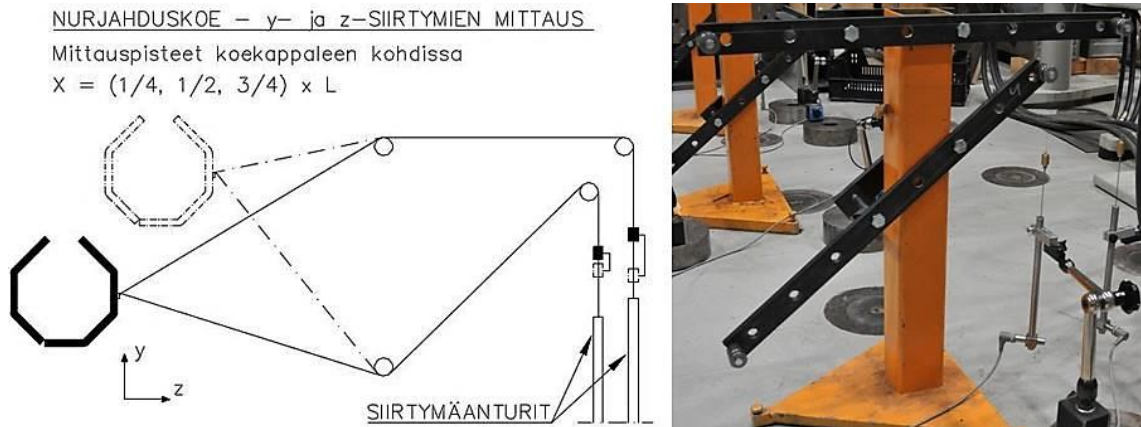
Kuva 5.29. Nurjahduskoeoskappaleiden päiden tuennat.

Nurjahduskokeissa käytetty tuentatapa estää kuvan 5.28 staattisen mallin mukaisesti koekappaleiden päiden kiertymät, vääntymät sekä pystysuuntaiset siirtymät. Koekappaleiden alkupään tuki estää vaakasuuntaiset siirtymät, mutta kuormitettavan pään C-paalin pituussuuntainen siirtymä on vapautettu laakeroinnin avulla. Laakerointi toteutettiin kuvan 5.29 mukaisesti 16 mm paksulla filmivanerilla sekä kahden 6 mm teräslevyn välissä olevalla lineaarilaakerikaistalla. Nurjahduskokeiden tuentatavan ja aiemmin kuvassa 4.8 esitettyjen nurjahduksen perustapausten mukaan koekappaleiden nurjahduspituus L_n on puolet koekappaleen pituudesta $L = 4000$ mm, jolloin

$$L_n = 0,5 \times 4000 \text{ mm} = 2000 \text{ mm}.$$

Nurjahduskokeista mitattiin puristavan voiman lisäksi koekappaleiden kokoonpuristuma mittaamalla induktiivisella siirtymäanturilla hydraulisylinterin ulkonema. Kokoonpuristuman lisäksi koekappaleiden poikkileikkaustason suuntaisia siirtymiä arvioitiin kuvassa 5.30 esitetyn mittausjärjestelyn avulla kolmesta koekappaleen kohdasta: $x = \{1, 2, 3\}$ m. Koekappaleiden särmän keskelle kiinnitetyt siimalangot kiersivät paikallaan pysy-

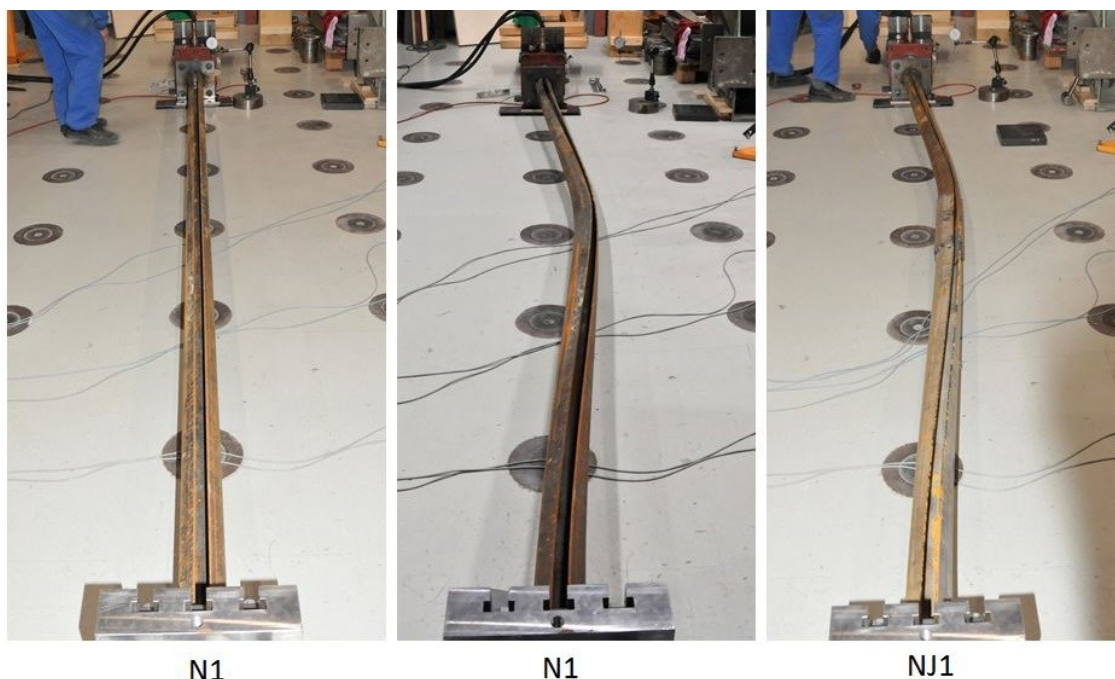
vien pyörien kautta punnuksiin, joiden siirtymät mitattiin induktiivisilla siirtymäantureilla. Kun siirtymättömien pyörien sijainnit tunnetaan, voidaan kuvassa 5.30 esitetyn mittausrakenteen avulla arvioida poikkileikkauksen tasonsuuntaisia siirtymiä. Mittausrakenteen ei otta huomioon poikkileikkauksen mahdollista kiertymistä tai sen sisäisiä muodonmuutoksia.



Kuva 5.30. Nurjahduskokeen poikkileikkauksen tasonsuuntaisten siirtymien mittaaminen.

5.5.2 Mittaustulokset ja niiden arviointi

Koekappaleet kuormitettiin siten, että niiden pituussuuntainen katkohitsisauma sijaitsi kuvan 5.31 mukaisesti C-paalun vasemmalla. Kaikki koekappaleet kuormitettiin nopeudella 30 kN/min ja kuormitukset pysäytettiin koekappaleiden nurjahtamisen jälkeen. Kaikki koekappaleet menettivät stabiiliutensa taivutusvääntönurjahtamalla. Jatkamatottomat koekappaleet N1...N3 sekä jatkettut koekappaleet NJ1 ja NJ2 nurjahtivat kuvan 5.31 mukaisesti oikealle puolelle kiertäen pituusakselinsa ympäri kohti lattiaa kun taas jatkettu koekappale NJ3 nurjahti vasemmalle eli pituussuuntaisen katkohitsin puolelle. Koetuloksia arvioidessa on huomioitava, että vaikka koekappaleita kuormitettiin niiden päiden poikkileikkausten suhteen keskeisesti, niin koekappaleiden alkukaarevuudesta johtuen kuormitus ei ollut täysin keskeinen pituusakselin koko matkalla.



Kuva 5.31. Nurjahduskokeet ennen ja jälkeen kuormituksen.

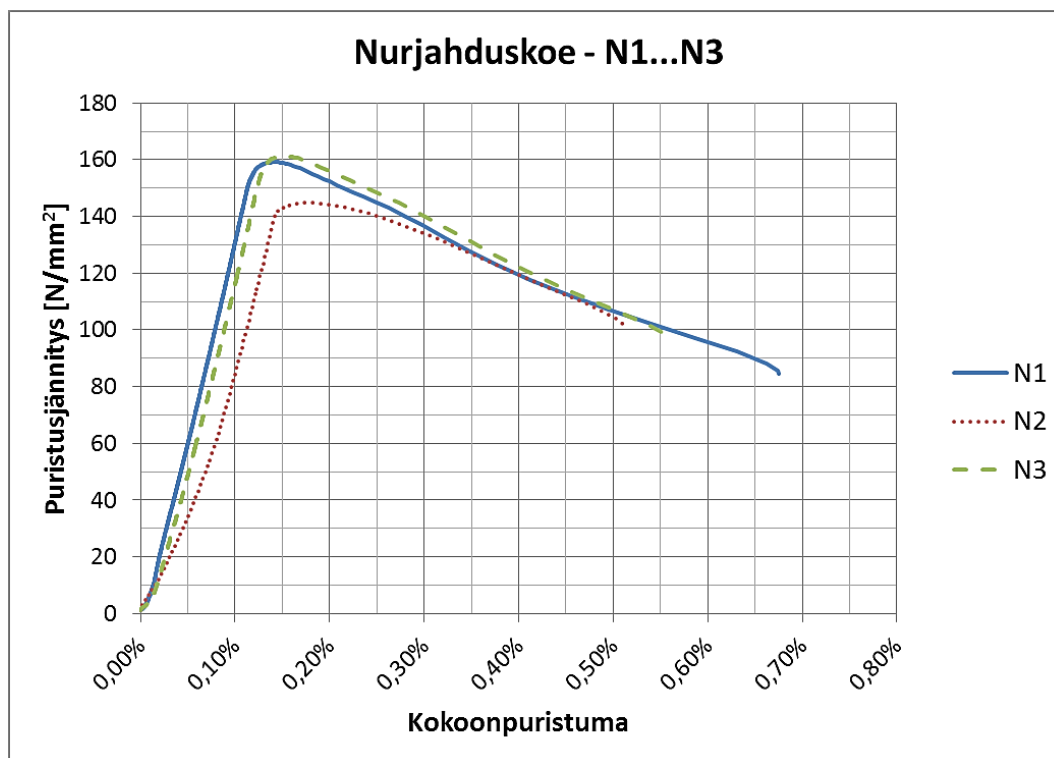
Koekappaleiden poikkileikkausten muodoissa ei havaittu muodonmuutoksia ennen nurjahtamista, mutta kappaleiden nurjahtamisen jälkeen hahlon kohdalla oli havaittavissa pientä sulkeutumista. Pituussuuntaisissa katkohaitsisaumoissa eikä holkkijatkosten hitseissä havaittu muodonmuutoksia kuormitusten jälkeen. Koekappaleiden poikkileikkaustason suuntaisten siirtymien mittaustulokset on esitetty liitteessä 8.

Nurjahduskokeiden N1...N3 tulokset

Jatkamattomien koekappaleiden N1...N3 nurjahduskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 5.14. Taulukossa on esitetty nurjahduskuormien P_{cr} lisäksi koekappaleiden nurjahduspituudet L_n , poikkipinta-alat A_p , suoruuspoikkeamat Δy ja Δz sekä nurjahdusjännitys σ_{cr} , joka on saatu jakamalla nurjahduskuorma poikkipinta-alalla A_p . Kuvassa 5.32 on esitetty koekappaleiden N1...N3 jännitys-muodonmuutoskuvaajat, joissa pystyakselilla on puristusjännitys ja vaaka-akselilla kokoonpuristuma. Kokeiden perusteella C-paalun nurjahduskuorman keskiarvoksi saatiin 232,12 kN nurjahduspituuden ollessa keskimäärin 1999,3 mm.

Taulukko 5.14. Nurjahduskokeiden N1...N3 tulokset.

Tunnus	L_n [mm]	A_p [mm ²]	Suoruuspoikkeama		P_{cr} [kN]	σ_{cr} [N/mm ²]
			Δy [mm]	Δz [mm]		
N1	1998,9	1506,7	-5,0	-4,0	239,90	159,22
N2	1999,2	1482,6	-6,0	-4,5	214,79	144,87
N3	1999,8	1506,0	-3,5	-4,5	241,68	160,48
Keskiarvo	1999,3	1498,4	-4,8	-4,3	232,12	154,86
Keskihajonta	0,46	13,72	1,29	0,29	15,04	8,67
Variaatiokerroin	0,02 %	0,92 %	26,03 %	6,66 %	6,48 %	5,60 %



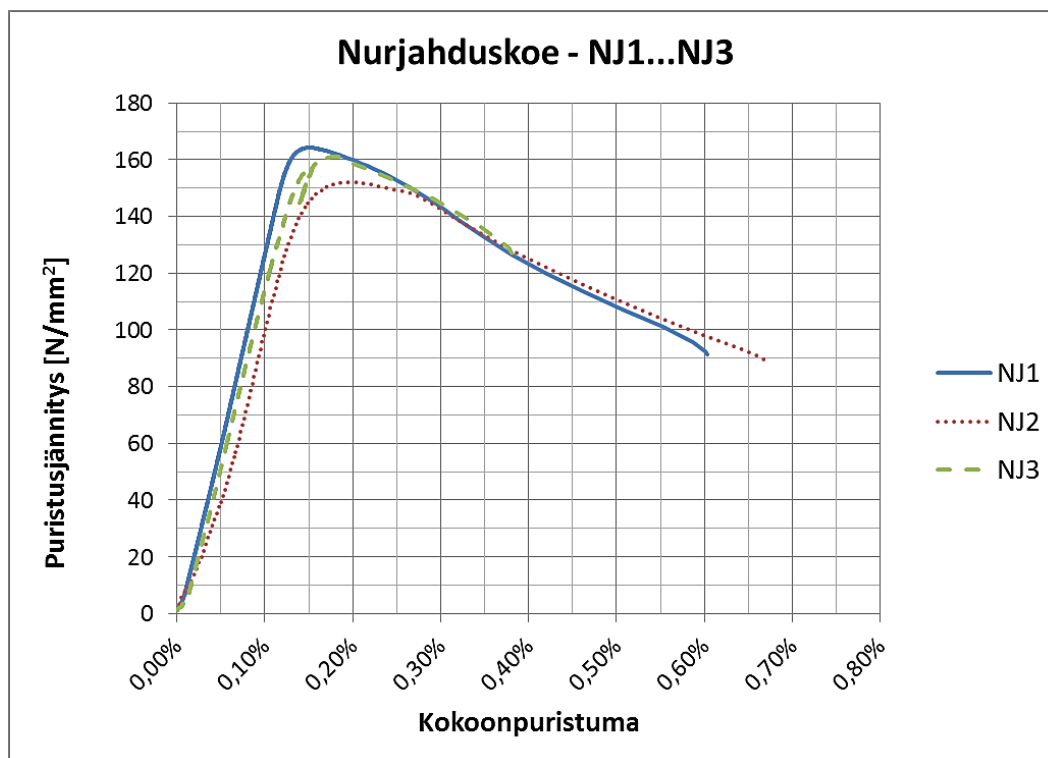
Kuva 5.32. Nurjahduskokeiden N1...N3 jännitys-muodonmuutoskuvaaja.

Jatkettujen C-paalujen taivutuskokeiden NJ1...NJ3 tulokset

Jatkettujen koekappaleiden NJ1...NJ3 tulokset on esitetty taulukossa 5.15. Koetulosten perusteella jatkettun C-paalun nurjahduskestävyyden keskiarvoksi saatiin 238,71 kN nurjahduspituuden ollessa keskimäärin 1999,0 mm. Koekappale NJ3 alkoi kokeen aikana värähdellä kuorman ollessa noin 234 kN, minkä seurauksena koe jouduttiin pysäyttämään hetkeksi. Pysäyttämisen jälkeen puristuskuormaa laskettiin 20 kN, jonka jälkeen koekappale saatiin nurjautettua kuormalla 243,45 kN ilman, että se alkoi värähdellä uudestaan. Koekappaleen NJ3 värähtely on havaittavissa koekappaleille NJ1...NJ3 piirretystä jännitys-muodonmuutoskuvaajasta, joka on esitetty kuvassa 5.33 sekä liitteessä 8 esitetyistä poikkileikkausten tasonsuuntaisten siirtymien mittaustuloksista.

Taulukko 5.15. Nurjahduskokeiden NJ1...NJ3 tulokset.

Tunnus	L_n [mm]	A_p [mm ²]	SuoruuSpoikkeama		P_{cr} [kN]	σ_{cr} [N/mm ²]
			Δy [mm]	Δz [mm]		
NJ1	2000,1	1494,2	0,0	-3,0	245,50	164,30
NJ2	1999,0	1491,9	-4,5	-4,5	227,18	152,27
NJ3	1997,9	1495,9	-1,5	-2,0	243,45	162,74
Keskiarvo	1999,0	1494,0	-2,0	-3,2	238,71	159,77
Keskihajonta	1,10	2,01	2,29	1,26	10,04	6,51
Variaatiokerroin	0,06 %	0,13 %	114,56 %	39,74 %	4,21 %	4,09 %



Kuva 5.33. Nurjahduskokeiden NJ1...NJ3 jännitys-muodonmuutoskuvaajat.

Jatkoksen vaikutus C-paalun nurjahduskestävyyteen

Jatkamattomien ja jatkettujen koekappaleiden taulukoissa 5.14 ja 5.15 esitettyjen tulosten keskiarvot on esitetty taulukossa 5.16. Taulukossa 5.16 on laskettu tulosten keskiarvojen välinen poikkeama sekä suhteellinen ero verrattuna jatkettujen koekappaleiden NJ1...NJ3 tuloksiin.

Taulukko 5.16. Nurjahduskokeiden N1...N3 ja NJ1...NJ3 vertailu.

	N1...N3	NJ1...NJ3	Poikkeama	Suhteellinen ero
Nurjahduskuorma P_{cr} [kN]	232,12	238,71	+6,59	+2,84 %
Nurjahdusjännitys σ_{cr} [N/mm ²]	154,86	159,77	+4,91	+3,17 %
Suoruspöikkeama Δy [mm]	-4,8	-2,0	+2,8	-58,33 %
Suoruspöikkeama Δz [mm]	-4,3	-3,2	+1,1	-25,58 %

Koetulosten perusteella jatkettujen koekappaleiden NJ1...NJ3 nurjahduskestävyydet olivat nurjahdusjännitysten keskiarvojen perusteella 3,17 % suurempia kuin jatkamattomien koekappaleiden N1...N3 nurjahduskestävyydet. Jatkettujen koekappaleiden suoruspöikkeamat olivat kuitenkin y-suunnassa 58,33 % ja z-suunnassa 25,58 % pienemmät kuin jatkamattomien koekappaleiden. Suoruspöikkeamien välisestä erosta johtuen kuormituskokeiden tulosten perustella ei voida sanoa, että jatkettu C-paalut ovat nurjahduskestävämpiä kuin jatkamattomat C-paalut, ennen kuin suoruspöikkeamien vaikutus nurjahduskestävyyteen on tutkittu. Suoruspöikkeamien vaikutusta nurjahduskestävyyteen arvioidaan kohdassa 6.3.1.

Liitteessä 8 esitettyjen poikkileikkaustason suuntaisissa siirtymäkuvaajissa ei ole suurta eroa koekappaleiden N1...N3 sekä NJ1 ja NJ2 välillä ennen nurjahdusta. Poikkileikkaustason suuntaisten siirtymäkuvaajien perusteella nurjahtaminen tapahtui lähes symmetrisesti koekappaleiden pituusakselien suhteen, jolloin koekappaleiden päiden kiinnitykset olivat jäykkyydeltään lähellä toisiaan. Liitteen 8 poikkileikkaustason suuntaisten siirtymien mittaustuloksissa on huomioitava, että käytetystä mittausten menetelmästä johtuen mittaustulosten virhe alkaa kasvaa heti nurjahtamisen jälkeen. Mittausvirhe on pientä ennen koekappaleen nurjahtamista, mutta nurjahtamisen jälkeen nopeasti kasvava kokoonpuristuma siirtää mittauspisteitä koekappaleen pituusakselia pitkin, jolloin mittausten virhe suurenee. Mittausvirhe on sitä suurempaa mitä lähempänä mittauspiste on koekappaleen kuormitettavaa päätä.

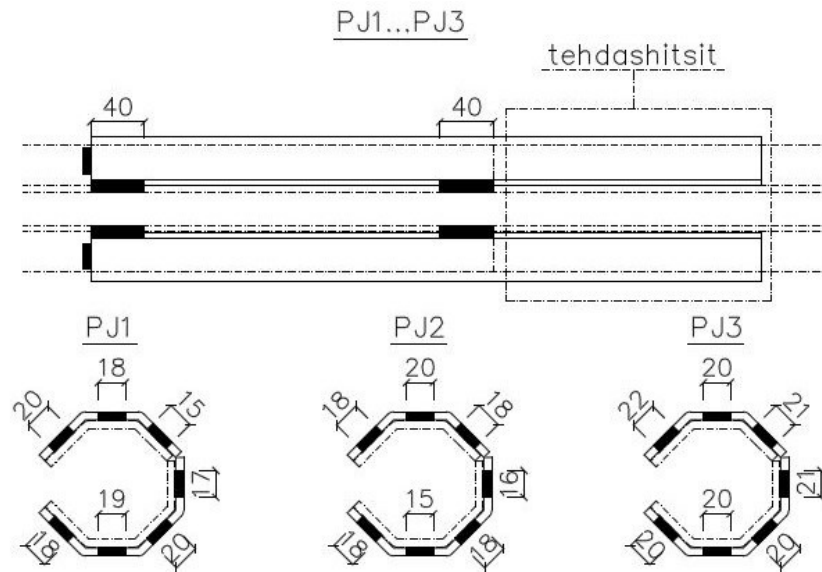
5.6 Jatkoksen puristuskoe

5.6.1 Koejärjestelyt

C-paalun holkkijatkoksen puristuskestävyyttä sekä holkkijatkoksen ja sen hitsien toimintaa tutkittiin kokeellisesti puristamalla jatkettuja 1000 mm pitkiä C-paaluja niiden murtoon asti. Jatkoksen puristuskokeiden tavoitteena oli tutkia miten C-paalujen jatkamisen yhteydessä jatkettavien C-paalujen välille mahdollisesti jäävä rako vaikuttaa puristetun holkkijatkoksen toimintaan. Kokeissa haluttiin selvittää kuinka paljon C-paalujen välinen rako painuu umpeen sekä murtuvatko holkkijatkoksen hitsit kokeen aikana.

Koekappaleet

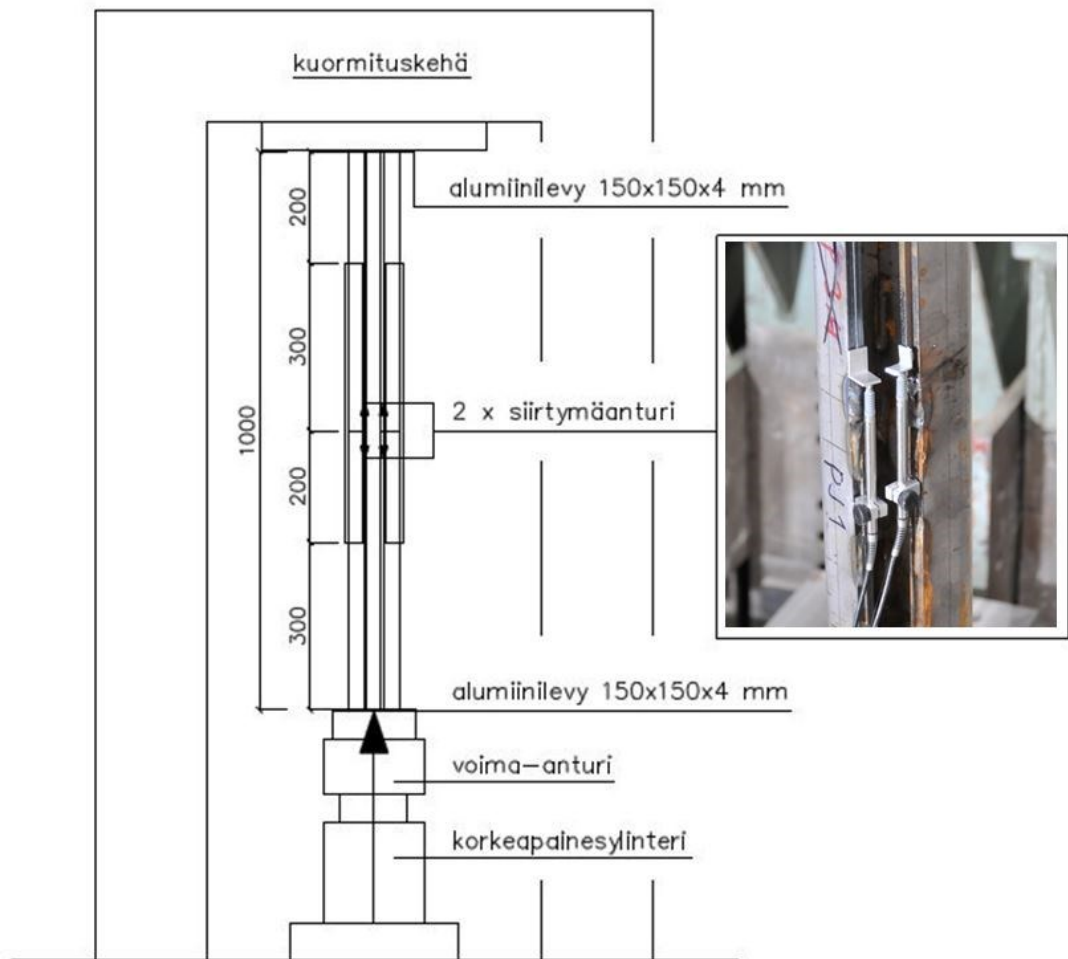
Jatkoksen puristuskokeita varten valmistettiin kolme 1000 mm pitkää jatkettua koekappaleita PJ1...PJ3. Jatketut koekappaleet valmistettiin hitsaamalla yhteen 500 mm pitkä jatkamaton C-paalu sekä 500 mm pitkä jatkospaalu, jonka päässä oli tehtaalla hitsattu holkkijatkos. Koekappaleiden PJ1...PJ3 holkkijatkokset hitsattiin kuvan 5.35 mukaisesti (a-mitta 4 mm) neljästä kohdasta 40 mm pituisilla pienahitseillä sekä keskeltä särmiä kuvassa esitettyjen hitsipituuksien mukaisesti. Koekappaleiden PJ1...PJ3 jatkospaalujen holkkijatkosten tehdashitsit oli hitsattu tiheämmin ja pidemmällä katkohitseillä kuin koehallilla tehdyt hitsit. Tehdashitsien tiedot on esitetty koekappaleiden PJ1...PJ3 mitattiedot sisältävässä liitteessä 9.



Kuva 5.34. Koekappaleiden PJ1...PJ3 holkkijatkosten hitsit.

Kuormitus- ja mittausjärjestelyt

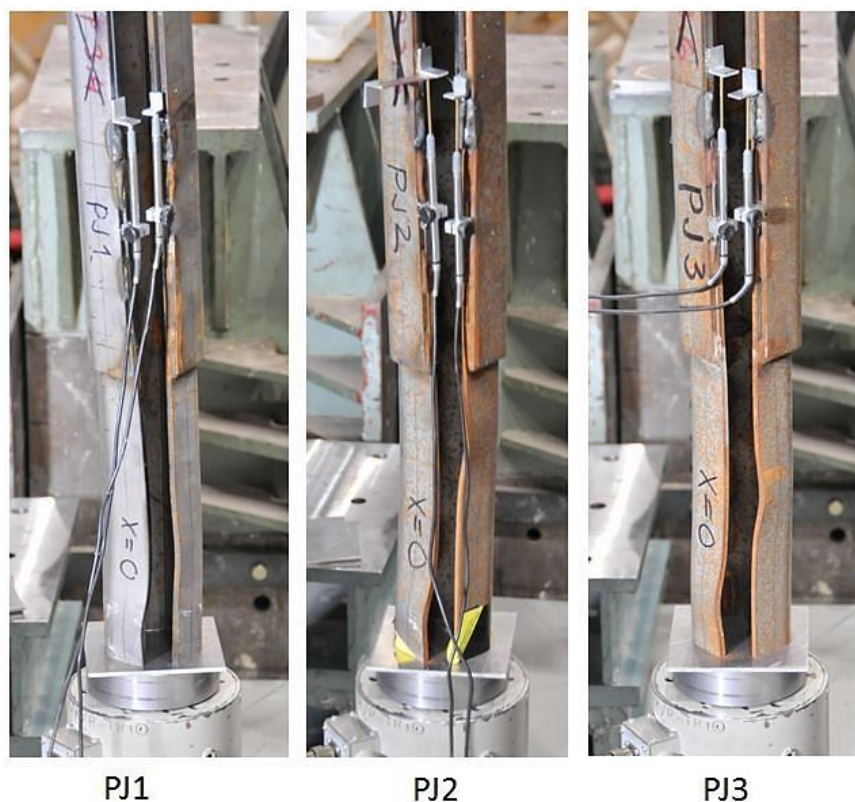
Kuvassa 5.35 on esitetty jatkoksen puristuskokeiden kuormitusjärjestelyt. Koekappaleet asetettiin pystyasennossa jäykän kuormituskehän ja kuormituslaitteiston väliin keskeisesti siten, että koehallilla hitsattu holkkijatkoksen puoli osoitti ylöspäin. Koekappaleiden molempiin päihin oli asetettu 150x150x4 mm alumiinilevyt, jotta puristusvoima välittyisi tasaisemmin koekappaleiden poikkileikkaukselle niiden pureutuessa alumiinilevyihin. Kuormituslaitteistona käytettiin korkeapainesylinteriä sekä voima-anturia HBM C6 (1000 kN), jolla mitattiin puristavan voiman suuruus sekä kappaleen kokoonpuristuma. Korkeapainesylinteriä ohjattiin käsikäyttöisellä paineilmapumpulla, jolloin kuormitusnopeus vaihteli arvojen 3,2...4,3 kN/s välillä. Jatsettujen C-paalujen välillä olevan raon kokoonpuristumaa mitattiin kahdella induktiivisella siirtymäanturilla, jotka oli kiinnitetty raon yli jatkettavien paalujen hahlojen reunoille kuvan 5.35 mukaisesti.



Kuva 5.35. Jatkoksen puristuskokeiden kuormitusjärjestelyt.

5.6.2 Mittaustulokset ja niiden arviointi

Koekappaleita PJ1...PJ3 puristettiin keskeisesti niiden myötäämiseen asti ja kuormittaminen pysäytettiin suhteellisen kokoonpuristuman ollessa 1,0...1,2 %. Koekappaleet myötivät kuvan 5.36 mukaisesti holkkijatkoksen ja kuormitettavan pään välistä. Holkkijatkoksen hitseissä ja koekappaleiden pituussuuntaisissa hitsisaumoissa ei ollut havaittavissa muodonmuutoksia. Koekappaleiden holkkijatkosten yläpuolisessa osassa ei myöskään havaittu muodonmuutoksia.

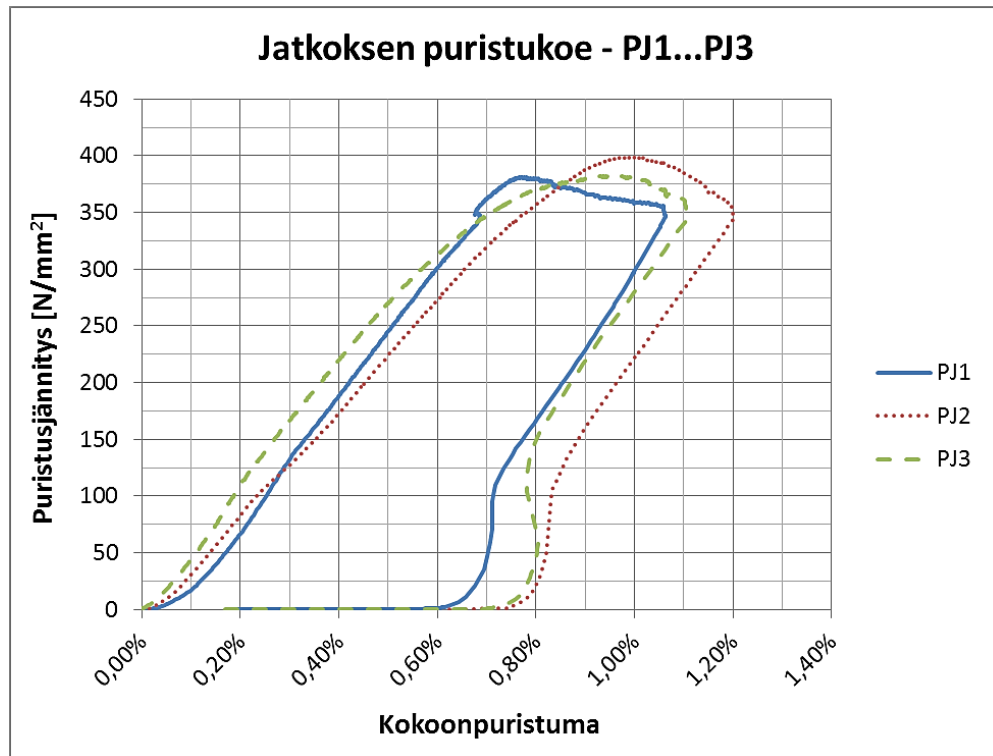


Kuva 5.36. Koekappaleet PJ1...PJ3 myötäämisen jälkeen.

Taulukossa 5.17 on esitetty jatkoksen puristuskokeiden PJ1...PJ3 myötökuormat sekä niitä vastaavat myötöjännitykset, jotka on laskettu jakamalla myötökuorman arvo mitatulla C-paalun varsiosan pinta-alalla A_p . Taulukossa on myös esitetty koekappaleista ennen koetta ja sen jälkeen mitattujen jatkettujen C-paalujen välillä olevien rakojen leveyksien keskiarvot. Kuvassa 5.37 on esitetty koekappaleiden puristuskokeiden PJ1...PJ3 jännitys-muodonmuutoskuvaajat, joissa pystyakselilla on puristusjännitys ja vaaka-akselilla suhteellinen kokoonpuristuma.

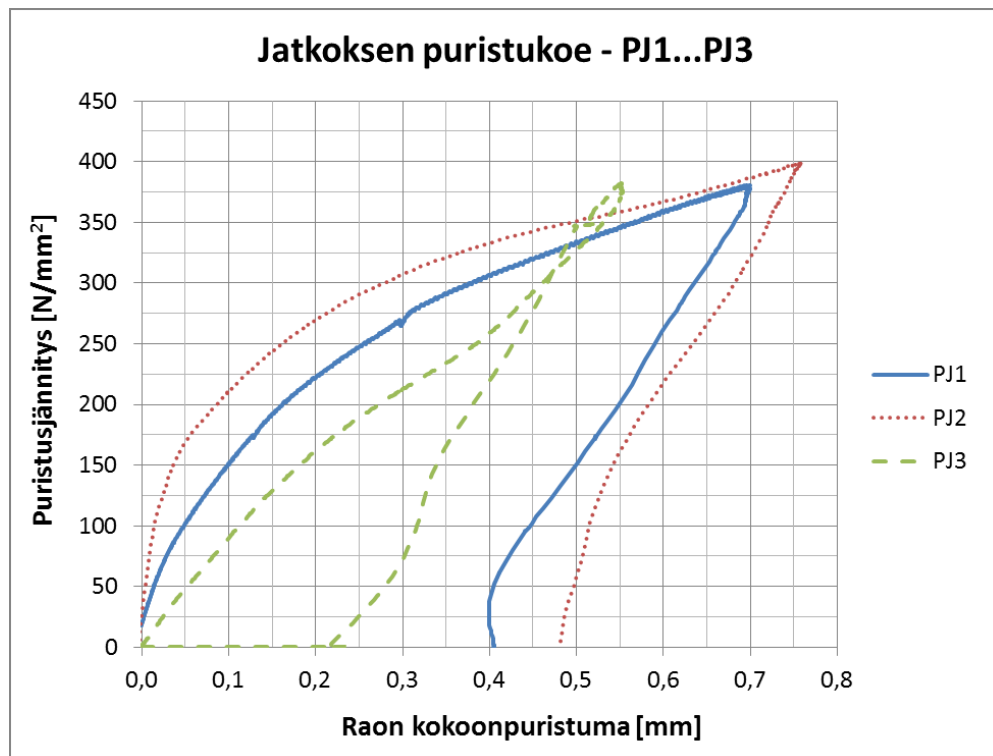
Taulukko 5.17. Jatkoksen puristuskokeiden PJ1...PJ3 tulokset.

Tunnus	A_p [mm ²]	Myötökuorma [kN]	Myötöjännitys [N/mm ²]	Raon leveys [mm]	
				ennen	jälkeen
PJ1	1483,3	565,6	381,3	1,1	0,7
PJ2	1475,0	589,0	399,3	0,9	0,4
PJ3	1478,8	565,2	382,2	0,4	0,2
Keskiarvo	1479,0	573,3	387,6	0,8	0,4
Keskihajonta	4,2	13,6	10,1	0,4	0,3
Variaatiokerroin	0,28 %	2,38 %	2,62 %	45,07 %	58,08 %



Kuva 5.37. Jatkoksen puristuskokeiden PJ1...PJ3 jännitys-muodonmuutoskuvaajat.

Kuvassa 5.38 on esitetty koekappaleiden puristuskokeiden PJ1...PJ3 rakojen kokoonpuristuman ja puristusjännityksen suhteen piirretyt kuvaajat. Raon kokoonpuristuma on keskiarvo raon kokoonpuristumaa mitanneiden kahden siirtymäanturin mittaustuloksista.



Kuva 5.38. Jatkoksen puristuskokeiden PJ1...PJ3 rakojen kokoonpuristumat.

Kuvan 5.38 kuvaajien perusteella holkkijatkokset joustivat kokeen aikana, jolloin jatkettujen paalujen väliset raot pääsivät kapenemaan. Kuormituksen jälkeen rakojen leveydet pienenivät pysyvästi keskimäärin 47,31 %. Kokeiden perusteella saatiin koekappaleiden myötökuorman keskiarvoksi 573,3 kN variaatiokertoimella 2,38 %. Sen sijaan ennen koetta mitattujen rakojen leveydet vaihtelivat enemmän variaatiokertoimen ollessa 45,07 %. Kokeiden perusteella jatkettavien C-paalujen välille jääneellä raolla ei ollut vaikutusta myötökuorman arvoon, kun koekappaleet oli hitsattu kuvan 5.34 mukaisesti.

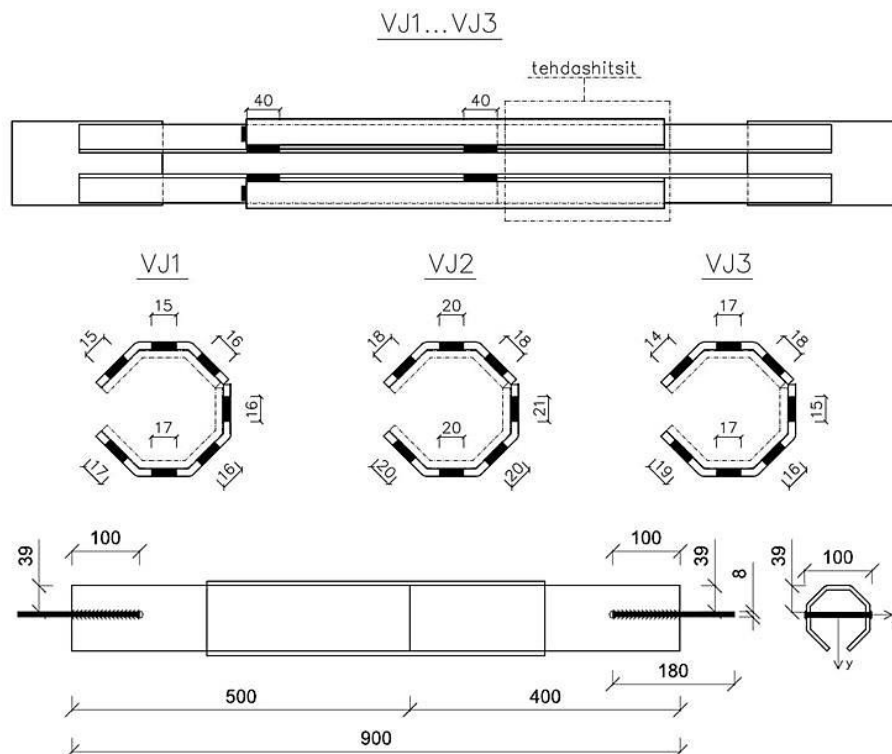
5.7 Jatkoksen vetokoe

5.7.1 Koejärjestelyt

C-paalujen jatkoksille tehtiin vetokokeita, joiden tavoitteena oli tutkia, toteuttavatko koekappaleet paalun jatkoksen vetokestävyydelle standardin EN 1993-5 kansallisessa liitteessä esitetyt vaatimukset. Standardin vaatimusten mukaan paalun jatkoksen vetokestävyyden ominaisarvon tulee olla vähintään 15 % paalun puristuskestävyyden ominaisarvosta, kun korroosiovaraa ei oteta huomioon (NA SFS-EN 1993-5, kohta 7.4.2).

Koekappaleet

Jatkoksen vetokokeisiin valmistettiin kolme kuvan 5.39 mukaisia 900 mm pitkää jatkettua koekappaletta VJ1...VJ3. Koekappaleiden päihin asennettiin 180x100x8 mm teräslevyt, jotka sijaitsevat poikkileikkausten painopisteessä y-akselin suhteen. Teräslevyt hitsattiin molemmilta C-paalun ulkoreunoilta kahdella pituussuuntaisella 100 mm hitsillä (a-mitta 4 mm), jolloin yhteen teräslevyyn tuli paalun neljä 100 mm pitkää hitsiä.

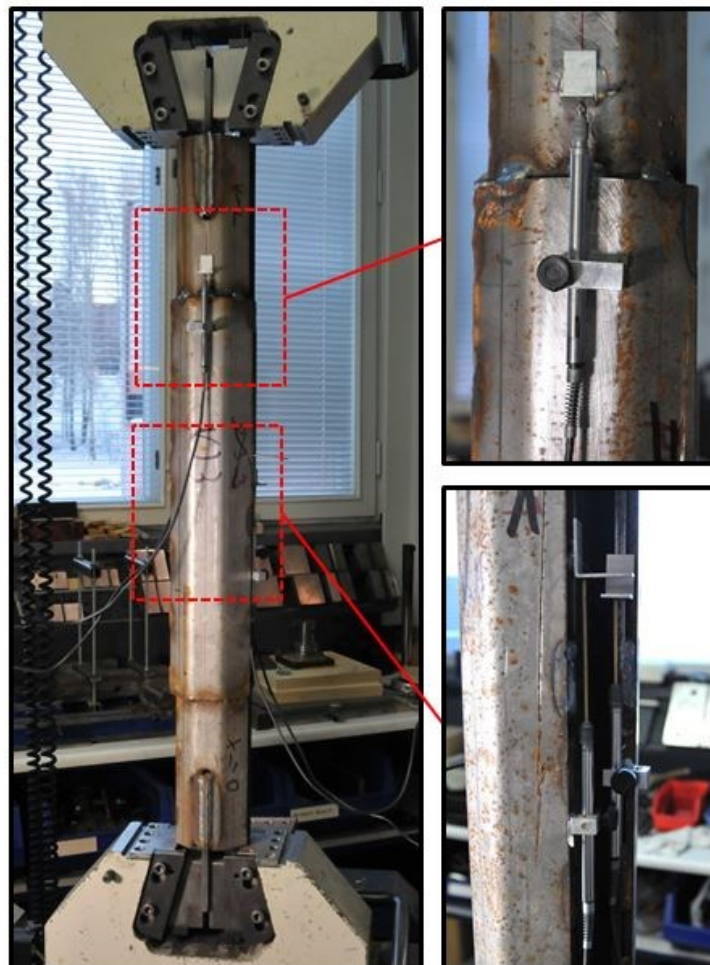


Kuva 5.39. Koekappaleiden VJ1...VJ3 päämitat ja holkkijatkosten hitsit.

Koekappaleiden VJ1...VJ3 holkkijatkokset hitsattiin (a-mitta 4 mm) neljästä kohdasta 40 mm pituisilla pienahitseillä sekä keskeltä särkeä kuvassa 5.39 esitettyjen hitsipituuksien mukaisesti. Koekappaleiden VJ1...VJ3 jatkospaalujen holkkijatkosten tehdashitsit oli hitsattu tiheämmin ja pidemmällä katkositseillä kuin koehallilla tehtyt hitsit. Tehdashitsien tiedot on esitetty koekappaleiden VJ1...VJ3 mittatiedot sisältävässä liitteessä 10.

Kuormitus- ja mittausjärjestelyt

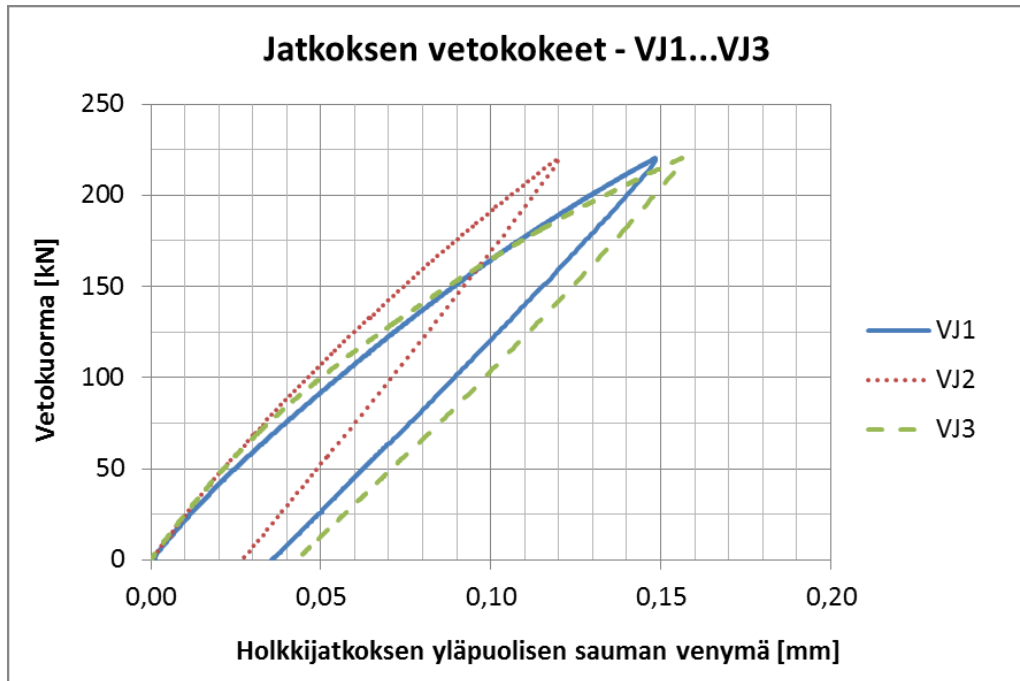
Jatkoksen vetokokeet suoritettiin tietokoneohjatulla Zwick RK250/50 yleisaineenkovetuslaitteella. Vetokoelaitteiston kapasiteetti on 220 kN, joka riittää standardin vaatimusten mukaan paalujen, joiden puristuskestävyyden ominaisarvo on 1466,67 kN, jatkosten tutkimiseen. Koekappaleet kiinnitettiin kuvan 5.40 mukaisesti vetokoelaitteiston leukoihin koekappaleisiin hitsatuista terälevyistä siten, että koehallilla hitsattu holkkijatkoksen puoli osoitti ylöspäin. Koekappaleista mitattiin kuvan 5.40 mukaisesti holkkijatkoksen ylemmän hitsisauman sekä jatkettujen C-paalujen välisen raon venymää. Ylemmän sauman venymää mitattiin kahdella C-paalun molemmille sivuille asennetuilla induktiivisilla siirtymäantureilla. Jatsettujen C-paalujen välisen raon venymää mitattiin kahdella induktiivisella siirtymäanturilla, jotka oli kiinnitetty hahlojen reunoille.



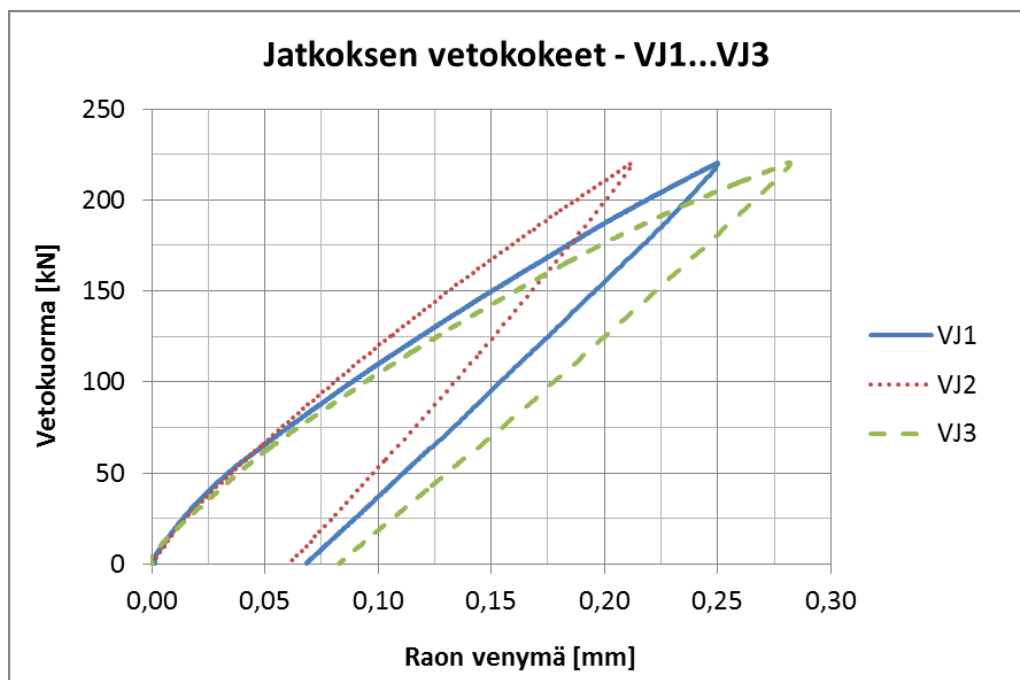
Kuva 5.40. Jatkoksen vetokokeiden kuormitus- ja mittausjärjestelyt.

5.7.2 Mittaustulokset

Koekappaleita vedettiin kuormitusnopeudella 20 kN/min ja kokeet pysäytettiin vetokuorman ollessa 220 kN. Kaikki koekappaleet kestivät kuormituksen ilman holkkijatkosten hitsien murtumista. Koekappaleissa ei ollut havaittavissa näkyviä muodonmuutoksia vetokokeen aikana tai sen jälkeen. Vetokokeiden mittaustulokset on esitetty kuvissa 5.41 ja 5.42, joissa on vetokuorman suhteen piirretyt venymää mitanneiden siirtymäantureiden keskiarvot.



Kuva 5.41. Jatkoksen vetokokeiden VJ1...VJ3 holkkijatkosten yläpuolisen sauman venymäkuvaajat.



Kuva 5.42. Jatkoksen vetokokeiden VJ1...VJ3 rakojen venymäkuvaajat.

Kuvien 5.41 ja 5.42 kuvaajista nähdään, että koekappaleen VJ2 holkkijatkoksen yläpuolisen sauman ja jatkettujen C-paalujen välillä olevan raon venymät olivat pienempiä kuin koekappaleiden VJ1 ja VJ3. Ero koekappaleen VJ2 ja koekappaleiden VJ1 ja VJ3 välillä johtunee siitä, että koekappaleen VJ2 holkkijatkoksen särmillä olevien katkohitsien yhteispituus oli 137 mm kun taas koekappaleella VJ1 vastaavien hitsien kokonaispituus oli 112 mm ja koekappaleella VJ3 116 mm. Jatkoksen vetokokeiden perusteella C-paalujen holkkijatkokset, jotka hitsataan vähintään kuvassa 5.39 esitetyn koekappaleen VJ1 tavoin, toteuttavat standardissa paalun jatkoksen vetokestävyydelle asetetut vaatimukset, kun paalun puristuskestävyyden ominaisarvo on enintään 1466,67 kN ($0,15 \times 1466,67 \text{ kN} = 220 \text{ kN}$).

Jatkoksen vetokokeiden tulosten luotettavuudessa on otettava huomioon, että hitsien laatua ei varmistettu minkään laatujärjestelmän mukaisesti. Lisäksi hitsien a-mitat ja pituudet on tarkistettu 0,5 mm tarkkuudella, joten mahdollisista mittausvirheistä aiheutuu tulosten luotettavuuteen epävarmuutta. Jos C-paalulle haetaan tulevaisuudessa CE-merkintää, tulee jatkossa jatkoksen vetokestävyyden vaatimustenmukaisuutta tutkittaessa tarkistaa hitsien laatu ja mekaaniset ominaisuudet hitseistä otettavilla näytteillä.

6 Teoreettisen kantokestävyyden ja koetulosten vertailu ja analysointi

6.1 Yleistä

Kohdissa 6.2 ja 6.3 vertaillaan C-paalun teoreettisia taivutus- ja puristuskestävyyden arvoja niitä vastaaviin kokeellisiin arvoihin. Tarkoituksena on selvittää kuinka hyvin teoreettiset arvot vastaavat kokeellisia arvoja sekä esittää tulosten luotettavuuteen vaikuttavat epävarmuustekijät. Jatkoksen vetokokeiden tuloksia ei vertailla teoreettisiin arvoihin, sillä holkkijatkoksen katkohaitsit kestivät vetokokeet murtumatta.

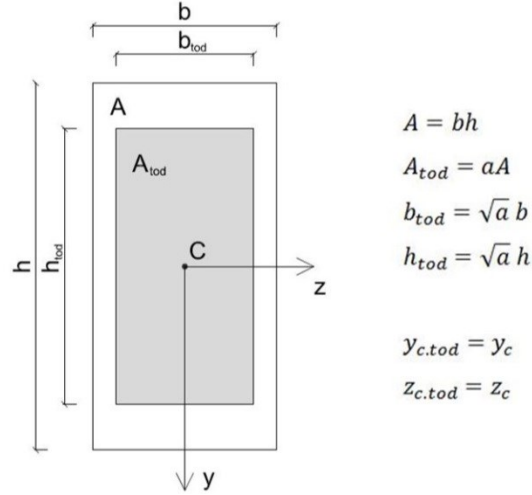
Koekuormituksissa käytettyjen koekappaleiden poikkileikkausmitat poikkesivat valmistuskuvien mukaisista mitoista aiemmin esitetyn taulukon 5.2 mukaisesti. Koekappaleet olivat ulkohalkaisijoiltaan keskimäärin 2,13...2,77 % ja keskimääräisiltä poikkipinta-aloiltaan 4,75 % pienempiä kuin valmistuskuvissa. Lisäksi standardin EN ISO 6892-1 mukaisten vetokokeiden perusteella koekappaleiden keskimääräinen ylempi myötöraja poikkesi +16,76 %, murtolujuus +6,36 % ja kimmokerroin -2,00 % standardin EN 1993-1-1 mukaisista arvoista. Koekappaleiden poiketessa teoreettisista arvoista sekä geometrisilta että mekaanisilta ominaisuuksiltaan ei koetuloksia voi suoraan verrata teoreettisiin laskelmiin. Geometrisista poikkeamista johtuen myös koekappaleiden poikkileikkaussuureet poikkeavat teoreettisista arvoista. Sen sijaan, että laskettaisiin jokaisen koekappaleen poikkileikkaussuureet mittaustietojen perusteella kohdassa 4.1 esitetyllä tavalla, voidaan koekappalekohtaisia poikkileikkaussuureita arvioida riittäväällä tarkkuudella kohdassa 6.1.1 esitettävällä tavalla skaalaamalla valmistuskuvien mukaisia poikkileikkaussuureita mitatun ja teoreettisen pinta-alojen suhteiden avulla.

6.1.1 Koekappalekohtaisten poikkileikkaussuureiden laskeminen

Kuvassa 6.1 on esitetty suorakaiteen muotoinen poikkileikkaus, jonka suunniteltu pinta-ala on A , sekä todellinen pinta-ala on A_{tod} . Suorakaiteen muotoisen poikkileikkauksen tapauksessa pääjäyhyydet I_y ja I_z lasketaan kaavoilla:

$$I_y = \frac{bh^3}{12}, \quad (6.1)$$

$$I_z = \frac{b^3h}{12}. \quad (6.2)$$



Kuva 6.1. Poikkileikkaussuureiden skaalaus pinta-alojen suhteiden avulla.

Kun sijoitetaan pääjäyhyyden laskentakaavoihin (6.1) ja (6.2) kuvassa 6.1 esitetyt todellisen poikkileikkauksen mitat, saadaan johdettua kaavat, missä todellisen poikkileikkauksen pääjäyhyydet saadaan laskettua pinta-alojen suhteiden neliön ja valmistuskuvien mukaisten pääjäyhyyksien avulla:

$$I_{y.tod} = \frac{b_{tod} h_{tod}^3}{12} = \frac{\sqrt{a} b (\sqrt{a} h)^3}{12} = a^2 \frac{bh^3}{12} = \left(\frac{A_{tod}}{A} \right)^2 I_y, \quad (6.3)$$

$$I_{z.tod} = \frac{b_{tod}^3 h_{tod}}{12} = \frac{(\sqrt{a} b)^3 \sqrt{a} h}{12} = a^2 \frac{b^3 h}{12} = \left(\frac{A_{tod}}{A} \right)^2 I_z. \quad (6.4)$$

Koekuormituksissa käytettyjen koekappaleiden mittaustietojen mukaan (taulukko 5.2) C-paalujen poikkileikkaukset poikkesivat y-suunnassa (*D1*-mitta) -2,69 % ja z-suunnassa (*D2*-mitta) -2,34 % valmistuskuvien mukaisista mitoista. Poikkeamien ollessa lähes yhtä suuret voidaan koekappaleiden pääjäyhyyshmomentit laskea kaavojen (6.3) ja (6.4) avulla. Oletetaan, että myös C-paalun todellinen sektoriaalinen jäyhyysmomentti $I_{\omega_{V.tod}}$ voidaan laskea pinta-alojen suhteen neliön avulla:

$$I_{\omega_{V.tod}} = \left(\frac{A_{tod}}{A} \right)^2 I_{\omega_V}, \quad (6.5)$$

Olettamalla, että koekappaleet olivat kuvan 6.1 mukaisesti tasaisesti valmistuskuvan mukaisia mittoja pienempiä, voidaan todellinen vääntökeskiön sijainti arvioida kaavoilla:

$$y_{V.tod} = \left(\frac{A_{tod}}{A} \right) y_V, \quad (6.6)$$

$$z_{V.tod} = \left(\frac{A_{tod}}{A} \right) z_V, \quad (6.7)$$

ja todellinen vääntöjäyhyysmomentti laskea kaavasta:

$$I_{t.tod} = \left(\frac{A_{tod}}{A} \right) I_t. \quad (6.8)$$

Kohdissa 6.1, 6.2 ja 6.3, joissa vertaillaan teoreettisia kantokestävyyden arvoja koetuloksiin, on teoreettiset arvot laskettu koekappalekohtaisesti käyttämällä pinta-aloilla skaalattuja poikkileikkaussuureita. Teoreettisia kantokestävyyksiä laskettaessa on käytetty kohdan 5.2 metallien vetokokeiden perusteella saatua myötörajan keskiarvoa $f_{y.tod} = 414,5$ MPa ja kimmokerrointa $E_{tod} = 205,8$ GPa. Lisäksi taivutuskestävyyttä laskettaessa (kaava (4.25)) on todellinen reunaetäisyys y_{tod} laskettu skaalaamalla valmistuskuvien mukaista reunaetäisyyttä DI -mittojen avulla:

$$y_{tod} = \left(\frac{D1_{tod}}{D1} \right) y. \quad (6.9)$$

6.1.2 Tulosten luotettavuuteen vaikuttavat epävarmuustekijät

Kokeellisesti ja teoreettisesti määritettyjen taivutuskestävyyden arvojen vertailussa on otettava koekohtaisesti huomioon mahdolliset epävarmuustekijät, jotka vaikuttavat tulosten arvojen luotettavuuteen. Joidenkin epävarmuustekijöiden vaikutusta tulosten luotettavuuteen on vaikea arvioida tarkasti. Koetuloksien luotettavuuteen vaikuttavia olennaisia epävarmuustekijöitä aiheutuu mm.

- koejärjestelyistä
- mittausjärjestelyistä
- koekappaleen geometrisista poikkeamista
- hitsaustekniikasta ja hitsin laadusta
- koekappaleen materiaaliominaisuuksien vaihtelusta.

Koejärjestelyissä koekappaleen todellisen tuentatavan ja laskelmissa käytetyn tuentavan vastaavuudella on merkitystä kuormien jakautumiseen ja sitä kautta koetulosten luotettavuuteen. Teoreettisen tuentatavan toteutumista käytännössä tulisi tutkia erillisillä kokeilla. Koekuormituksissa käytettiin kalibroituja mittauslaitteita, joiden suurin mittausvirhe on pienempi kuin 0,5 %. Lisäksi mittausjärjestelyistä aiheutuu epävarmuutta mittaustantureiden sijainti- ja kohtisuoruuspoikkeamista. Koekappaleen geometriset poikkeamat kuten alkukaarevuus, vinous ja poikkileikkauksen muodon poikkeamat sekä käytettyjen katkohitsien väliset etäisyydet, katkohitsien pituudet ja laatu vaikuttavat jännitysten jakautumiseen. C-paalun nurjahduskestävyyden herkkyyttä alkukaarevuudesta aiheutuvan kuorman epäkeskeisyyden suhteen tutkitaan kohdassa 6.3.1. Koekappaleissa käytettyjen alkuperäisten C-paalujen erässä oli kahdesta eri materiaali-erästä valmistettuja C-paaluja. Materiaali-erät vaihtelivat keskenään variaatiokertoimen ollessa myötö- ja murtolujuuksilla 2,3 % ja kimmokertoimilla 1,1 %.

Teoreettisten kantokestävyyksien luotettavuuteen vaikuttavat poikkileikkaussuureiden laskemisessa tehdyt oletukset. Poikkileikkaussuureiden laskemisessa kohdassa 4.1 jätettiin katkohitsi huomioimatta ja oletettiin poikkileikkauksen nurkan olevan ehjän katkohitsien väliltä, jolloin poikkileikkaussuureiksi saatiin n. 2 % todellisia suurempia arvoja. Koekappalekohtaisten poikkileikkaussuureiden laskeminen pinta-alojen suhteen avulla

skaalaamalla johtaa epätarkkoihin arvoihin ja siten myös epätarkkoihin teoreettisiin kantokestävyyden laskenta-arvoihin. Menetelmän epätarkkuutta arvioitiin laskemalla koekappaleen N1 poikkileikkaussuureet sen todellisten mittojen avulla sekä skaalaamalla poikkileikkaussuureita pinta-alojen suhteiden avulla. Koekappaleen N1 tapauksessa skaalaamalla lasketut poikkileikkaussuureet olivat likimain 1,7 % todellisia poikkileikkaussuureita pienempiä.

Teoreettisen kantokestävyyden luotettavuuteen vaikuttaa myös valitun laskentateorian soveltuvuus tutkittavalle poikkileikkaukselle. Kohdassa 4.2 tutkittiin C-paalun nurjahduskestävyyttä Vlasovin taivutusvääntönurjahduksen sekä FEM-menetelmällä kuorielementtejä käyttäen. Koska Vlasovin teorialla ja FEM-menetelmällä lasketut C-paalun nurjahduskestävyyden arvot ovat hyvin lähellä toisiaan (taulukko 4.10) voidaan olettaa sekä Vlasovin taivutusvääntönurjahdusteorian että FEM-laskelmissa käytetyn kuorielementtimallin soveltuvan C-paalun kantokestävyyksien tutkimiseen.

6.2 Taivutuskestävyys

Taulukossa 6.1 on vertailtu taivutuskokeiden T1...T3 ja TJ2...TJ4 perusteella saatuja C-paalun ja jatkettun C-paalun taivutuskestävyyden arvoja niitä vastaaviin teoreettisiin arvoihin. Jatkettu koekappale TJ1 ei ole mukana vertailussa, sillä sen jatkos murtui kesken taivutuskokeen. Taulukon 6.1 teoreettiset kantokestävyyden arvot on laskettu koekappalekohtaisesti skaalaamalla kohdassa 4.4 jatkamattomalle C-paalulle laskettua taivutuskestävyyden ominaisarvoa $M_p = M_z = 9,98 \text{ kNm}$ kaavojen (6.3), (6.4) ja (6.9) avulla sekä myötörajan todellisen ja teoreettisen arvon suhteella:

$$M_{z.tod} = \left(\frac{A_{tod}}{A} \right)^2 \left(\frac{D1}{D1_{tod}} \right) \left(\frac{f_{y.tod}}{f_y} \right) M_z,$$

missä valmistuskuvien mukaisena pinta-alana A on käytetty taulukon 5.2 mukaista keskimääräistä pinta-alaa $A_{p,ka} = 1575,8 \text{ mm}^2$ ja $D1$ -mittana arvoa 96,5 mm.

Taulukko 6.1. Taivutuskestävyyksien teoreettisten arvojen ja koetulosten vertailu.

Tunnus	Taivutuskestävyys $M_p = M_z$ [kNm]		Suhteellinen poikkeama
	Teoreettinen arvo	Koetulos	
T1	10,936	11,448	+4,68 %
T2	10,815	11,279	+4,29 %
T3	10,877	11,338	+4,24 %
TJ2	10,787	10,838	+0,47 %
TJ3	10,781	10,566	-2,00 %
TJ4	10,745	10,895	+1,40 %
Keskiarvo	10,824	11,061	+2,18 %
Keskihajonta	0,071	0,345	2,68 %
Variaatiokerroin	0,65 %	3,12 %	

Taivutuskokeiden tulosten luotettavuuteen sisältyy kohdassa 6.1.2 esitettyjä epävarmuustekijöitä. Taivutuskokeissa käytettyä päistään haarukkalaakeroitua ja toisesta päästään vaakasuuntaisen liikkeen sallivaa tuentatapaa (kuvat 5.16 ja 5.17) on käytetty Aalto-yliopiston rakennetekniikan koehallilla useissa kokeissa. Aiempien kokeiden ja taulukossa 6.1 esitettyjen koetulosten keskihajonnan ollessa vähäistä (variaatiokerroin 3,12 %) voidaan olettaa, että taivutuskokeiden tuentatapa vastasi reunaehdoiltaan teoreettista tuentatapaa. Kun kohdassa 6.1.2 esitetyistä tulosten luotettavuuteen vaikuttavista epävarmuustekijöistä otetaan huomioon mitattavissa olevat virheet, voidaan taivutuskokeiden luotettavuuden kokonaisepävarmuutta arvioida. Poikkileikkaussuureiden laskemisessa tehdyistä olettamuksista johtuen on teoreettisen taivutuskestävyyden arvoksi saatu aluksi ~2 % todellista suurempi arvo ja sen jälkeen koekappalekohtaisessa skaalauksessa ~1,7 % todellista pienempi. Lisäksi koekappaleiden teräksen myötölujuuksien variaatiokerroin oli 2,3 % ja mittalaitteiston mittausrvirhe alle 0,5 %. Kun otetaan huomioon, että osa virheistä kumoaa toisena ja se, että teoreettisten ja koetulosten variaatiokertoimet olivat pieniä, koetulokset vastasivat hyvin niitä vastaavia teoreettisia arvoja. Taulukon 6.1 arvojen perusteella kaikkien koekappaleiden kokeellisesti määritetyt taivutuskestävyyden arvot olivat keskimäärin 2,18 % teoreettisia arvoja suurempia.

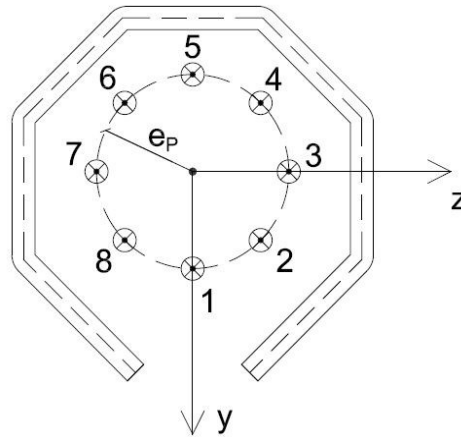
Taulukon 6.1 perusteella jatkamattomat C-paalut saavuttivat kokeellisesti keskimäärin 4,40 % teoreettisia taivutuskestävyyksiä suuremmat arvot. Standardin EN 1993-5 kansallisessa liitteessä esitettyjen vaatimusten mukaan paalun jatkoksen taivutuskestävyyden ominaisarvon $M_{p,jatkos}$ tulee olla vähintään yhtä suuri kuin paalun jatkamattoman osan ominaisarvon M_p (NA SFS-EN 1993-5, kohta 7.4.2). Koetulosten perusteella standardin mukainen vaatimus ei aivan toteudu, sillä jatkettujen C-paalujen taivutuskestävyydet jäivät keskimäärin 0,04 % teoreettisista taivutuskestävyyksistä. Jatsettujen koekappaleiden TJ2...TJ4 taivutuskokeissa jatkokset pysyivät kuitenkin ehjinä koekappaleiden myötäessä jatkoksen ulkopuolelta. Jatsettuja paaluja kuormitettiin kuvassa 5.17 esitetyllä standardin mukaisella tavalla siten, että jatkettavien C-paalujen päät sijaitsivat pistekuormien keskellä. Kun holkkijatkoksen keskilinja poikkesi tällöin 50 mm jatkettavien päiden kontaktipinnasta, saattoivat taivutuskokeiden perusteella C-paalun varsisaa jäykemmät holkkijatkokset ohjata kuormaa epätasaisesti. Jatsettujen koekappaleiden taivutuskestävyyksien ollessa hyvin lähellä teoreettisia arvoja, tulisi jatkossa suositella taivutuskoe myös siten, että holkkijatkoksen keskilinja sijaitsisi pistekuormien keskellä tai sijoittamalla holkkijatkos jatkettavien paalujen suhteen symmetrisesti.

6.3 Puristuskestävyys

6.3.1 Herkkyysanalyysi puristuskuorman epäkeskeisyyden suhteen

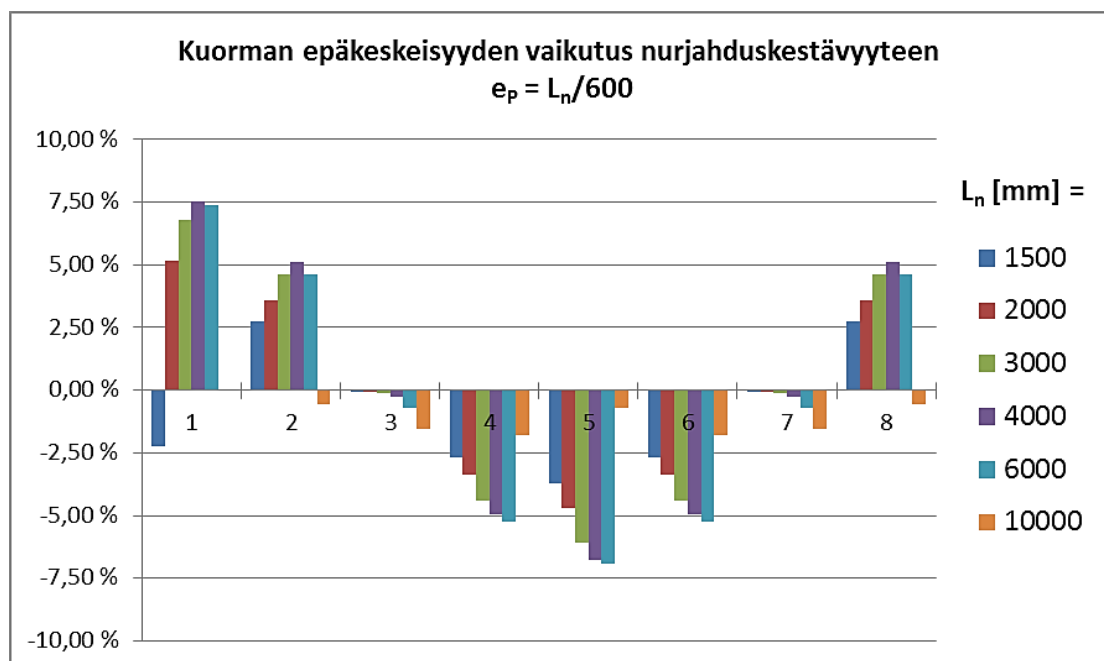
Kohdassa 6.1.2 esitettiin koetulosten luotettavuuteen vaikuttavia epävarmuustekijöitä. Jotta tiedettäisiin, kuinka suuri epävarmuus aiheutuu puristavan kuorman epäkeskeisyydestä, tutkittiin C-paalun nurjahduskestävyyden herkkyyttä puristuskuorman epäkeskeisyydelle laskemalla C-paalun nurjahduskestävyys nurjahduspituuksilla $L_n = (1,5; 2; 3; 4; 6; 10)$ m kuorman eri epäkeskeisyyksiä käyttäen. Kriittiset epäkeskeisen puristuskuorman arvot laskettiin päistään haarukkalaakeroitulle C-paalulle (nurjahduspituus L_n

$=L_v = L_w = L_\varphi$) kaavoilla (4.29) ja (4.36) käyttäen epäkeskeisyytenä aksiaalisesti kuormitetun porapaalun nurjahduskestävyystarkastelussa suositeltuja alkutaipuman arvoja: $(L_n / 800)$, $(L_n / 600)$, $(L_n / 500)$ ja $(L_n / 300)$ (RIL 254-1-2011, s. 107). Laskelmissa käytettiin kohdassa 4.1 määritettyjä poikkileikkaussuureita, myötörajaa $f_y = 355$ MPa ja kimmokerrointa $E = 210$ GPa.



Kuva 6.2. Kuorman epäkeskeisyys herkkyysanalyysissä.

Kriittiset epäkeskeisen puristuskuorman arvot laskettiin siten, että puristuskuorma sijaitsi kuvan 6.2 mukaisissa pisteissä. Vertaamalla epäkeskeisen puristuskuorman arvoja aiemmin laskettuihin keskeisen nurjahduskuorman arvoihin saatiin määritettyä epäkeskeisen kuorman vaikutus keskeisesti puristetun C-paalun nurjahduskestävyyteen. Kuvassa 6.3 on esitetty kuinka paljon epäkeskeisyydellä $e_P = L_n / 600$ laskettu kriittinen puristuskuorma poikkeaa keskeisesti puristetun C-paalun nurjahduskestävyydestä. Kuvan 6.3 vaaka-akselilla sijaitsevat laskentapisteet vastaavat kuvan 6.2 kuorman vaikutuspisteitä.



Kuva 6.3. Kuorman epäkeskeisyyden $e_P = L_n / 600$ vaikutus nurjahduskestävyyteen.

Kuvaa 6.3 vastaavat kuorman epäkeskeisyyksillä $e_p = (L_n / 800)$, $(L_n / 500)$ ja $(L_n / 300)$ lasketut kuvat on esitetty liitteessä 11. C-paalun nurjahduskestävyydelle tehdyn herkkyyksianalyysin perusteella kuorman epäkeskeisyydellä on eniten vaikutusta kuorman poiketessa y-akselin suunnassa eli kuorman sijaitessa kuvan 6.2 mukaisesti pisteissä 1 tai 5. Suurinta poikkeamaa keskeisesti puristetun C-paalun nurjahduskestävyydestä ei saavuteta tietyllä nurjahduspituudella, vaan suurimmat poikkeamat vaihtelivat eri nurjahduspituuksien välillä kuorman epäkeskeisyydestä sekä sen vaikutuspisteestä riippuen. Kuvasta 6.3 nähdään, että nurjahduspituudella $L_n = 10$ m epäkeskeisen kuorman vaikutus on itseisarvoltaan alle 1,8 % kun taas nurjahduspituudella $L_n = 6$ m poikkeamien suurin vaihteluväli on -6,92...+7,36 %. Koska puristavan kuorman epäkeskeisyyttä ei välttämättä tiedetä C-paalun kuormitustilanteessa, on taulukossa 6.2 esitetty poikkeamien vaihteluvälit kuormien eri epäkeskeisyyksillä riippumatta kuormituspisteen sijainnista.

Taulukko 6.2. Kuorman epäkeskeisyyden vaikutus nurjahduskestävyyteen.

Kuorman epäkeskeisyys e_p [mm]	Poikkeamien vaihteluväli (epävarmuus)
$L_n / 800$	-5,24 % ... +5,59 %
$L_n / 600$	-6,92 % ... +7,55 %
$L_n / 500$	-8,24 % ... +9,15 %
$L_n / 300$	-15,26 % ... +15,87 %

Taulukon 6.2 arvoista nähdään, että epäkeskeisyyden ollessa $e_p = L_n / 300$ kriittinen nurjahduskuorma vaihtelee jopa -15,24 % ... +15,87 % keskeisesti puristetun C-paalun nurjahduskuormasta. Kun otetaan huomioon, että -15,24 % poikkeama on laskettu nurjahduspituudella $L_n = 1500$ mm, jolloin pisteessä 1 vaikuttaneen kuorman epäkeskeisyys on ollut ainoastaan 5 mm, voidaan C-paalun nurjahduskestävyyden herkkyyttä kuorman epäkeskeisyydelle pitää merkittävänä. Taulukossa 6.2 esitettyä poikkeamien vaihteluväliä voidaan kutsua myös kuorman epäkeskeisyyden aiheuttamaksi nurjahduskestävyyden luotettavuuden epävarmuustekijäksi, joka tulee ottaa huomioon nurjahdustarkasteleissa.

6.3.2 Teoreettisten arvojen ja koetulosten vertailu ja analysointi

C-paalun puristuskestävyyttä tutkittiin kokeellisesti kolmella eri kokeella. Kokeiden tavoitteena oli tutkia kuinka hyvin C-paalun toiminta käytännössä vastaa teoreettisia laskelmia ja lisäksi selvittää kuinka holkkijatkos vaikuttaa puristetun C-paalun toimintaan. Aluksi suoritettiin lyhyen C-paalun varsi- ja kärkiosien puristuskokeet, joissa tavoitteena oli selvittää kärkiosan viisteiden ja reikien vaikutus varsiosan puristuskestävyyteen. Tämän jälkeen tutkittiin C-paalun ja jatkettun C-paalun stabiiliutta nurjahduskokeiden avulla. Lopuksi tehtiin jatkoksen puristuskokeet, joissa tutkittiin jatkoksen puristuskestävyyttä sekä jatkettavien paalujen päiden välille mahdollisesti jäävä raon vaikutusta holkkijatkoksen toimintaan. Lisäksi jatkoksen puristuskokeessa haluttiin nähdä, painuuko jatkettavien paalujen välinen rako umpeen ja murtuvatko holkkijatkoksen hitsit puristuskokeen aikana.

Lyhyen C-paalun kärki- ja varsiosan puristuskestävyys

Taulukossa 6.3 on vertailtu lyhyen C-paalun varsi- (P1...P3) ja kärkiosien (Pa1...Pa3) puristuskokeiden tuloksia niitä vastaaviin koekappalekohtaisiin teoreettisiin arvoihin. Teoreettisissa myötökuorman arvoja ei ole laskettu pinta-aloilla skaalaamalla vaan ne on laskettu kaavalla (4.17) käyttäen koekappaleista mitattuja pinta-aloja ja kohdan 5.2 metallien vetokokeiden perusteella saatua myötörajan keskiarvoa $f_{y,tod} = 414,5$ MPa.

Taulukko 6.3. Lyhyen C-paalun puristuskestävyyden teoreettisten arvojen ja koetulosten vertailu.

Tunnus	Myötökuorma [kN]		Suhteellinen poikkeama
	Teoreettinen arvo	Koetulos	
P1	626,1	673,6	+7,60 %
P2	624,7	673,7	+7,84 %
P3	626,6	674,2	+7,60 %
Pa1	572,4	600,7	+4,95 %
Pa2	565,3	605,5	+7,12 %
Pa3	563,0	608,5	+8,08 %

Taulukossa 6.3 esitettyjen lyhyiden C-paalun varsi- ja kärkiosien puristuskokeiden perusteella määritetyt myötökuorman arvot ovat keskimäärin 7,20 % teoreettisia arvoja suurempia. Tulosten perusteella lyhyen C-paalun myötökuorman laskeminen kaavaa (4.17) käyttäen näyttäisi antavan varmalla puolella olevan tuloksen. Aiemmin kohdassa 5.3.2 koetulosten perusteella arvioitiin kärkiosan reikien heikentävän C-paalun puristuskestävyyttä myötökuorman osalta 10,2 %. Taulukon 6.3 arvojen perusteella kärkiosien teoreettiset myötökuormat olivat keskimäärin 9,4 % varsiosan arvoja pienempiä.

Taulukon 6.3 teoreettisten arvojen ja koetulosten väliseen poikkeamaan voi vaikuttaa se, että koetulosten perusteella määritetyt myötökuorman arvot laskettiin kohdassa 5.3.2 0,2-rajaa soveltamalla. Koetulosten perusteella määritettyjen myötökuormien laskennassa 0,2 % kokoonpuristumasta piirrettävän suoran kulmakerroin valittiin siten, että se vastaa jännitys-muodonmuutoskuvaajan pisteiden, joissa puristuskuorma oli 200 kN ja 400 kN, välille piirrettävän suoran kulmakertoa. Kulmakertoimen valinnalla eri puristuskuorman arvojen kohdalla jännitys-muodonmuutoskuvaajan lineaariselta osalta on vähäinen vaikutus myötökuorman arvoon. Esimerkiksi koekappaleen P1 tapauksessa, kulmakertoimen valitseminen puristuskuorman arvojen 100 kN ja 300 kN tai 300 kN ja 500 kN väliltä johtaa ainoastaan 0,89 % aiemmin laskettua suurempaan myötökuorman arvoon. Lyhyen C-paalun puristuskokeet olivat kuormitusjärjestelyiltä yksinkertaisia, jolloin niistä aiheutuvat tulosten luotettavuuteen vaikuttavat epävarmuustekijät olivat vähäisiä. Tämä näkyy lyhyen C-paalun puristuskokeiden tulosten vähäisenä sisäisenä vaihteluna: myötökuormien variaatiokertoimet olivat varsiosilla 0,04 % ja kärkiosilla 0,65 % (taulukot 5.8 ja 5.9). Lyhyen C-paalun puristuskokeiden tulosten luotettavuuteen vaikuttaa kuitenkin kohdassa 6.1.2 esitetty mittalaitteiston mittausvirhe $< 0,5$ % sekä teräksen myötörajan vaihtelu variaatiokertoimella 2,3 %.

Lyhyen C-paalun puristuskokeissa havaittiin erilaisia kimmottoman alueen vääristymisnurjahdusmuotoja (kuvat 5.11 ja 5.13), joiden erottaminen ei onnistu myötö- ja murto-kuormien arvoista. Kokeiden perusteella C-paalun kimmottoman alueen vääristymisnurjahdusmuotoja vastaavien ominaiskuormien arvot ovat lähellä toisiaan. Tällöin geometriset poikkeamat määräävät C-paalun myötörajan ylittymisen jälkeisen vääristymisnurjahdusmuodon.

Jatkoksen puristuskestävyys

Taulukossa 6.4 on vertailtu C-paalun jatkoksen puristuskokeiden tuloksia niitä vastaaviin koekappalekohtaisiin teoreettisiin arvoihin. Teoreettisissa myötökuorman arvot on laskettu kaavalla (4.17) käyttäen koekappaleista mitattuja pinta-aloja ja kohdan 5.2 metallien vetokokeiden perusteella saatua myötörajan keskiarvoa $f_{y,tod} = 414,5$ MPa. Pinta-alana käytettiin varsiosan keskimääräistä pinta-alaa, sillä kokeiden perusteella holkkijatkos pysyi ehjänä kappaleiden myötäessä jatkoksen ulkopuolelta C-paalun varsiosasta kuvan 5.36 mukaisesti.

Taulukko 6.4. Jatkoksen puristuskestävyyden teoreettisten arvojen ja koetulosten vertailu.

Tunnus	Myötökuorma [kN]		Suhteellinen poikkeama
	Teoreettinen arvo	Koetulos	
PJ1	614,8	565,6	-8,01 %
PJ2	611,4	589,0	-3,66 %
PJ3	613,0	565,2	-7,79 %
Keskiarvo	613,1	573,3	-6,49 %
Keskihajonta	1,72	13,63	0,02
Variaatiokerroin	0,28 %	2,38 %	

Taulukossa 6.4 esitettyjen C-paalun jatkoksen puristuskokeiden perusteella määritetyt myötökuorman arvot ovat keskimäärin 6,49 % teoreettisia arvoja pienempiä. Myötökuorman teoreettisten arvojen laskennassa oletettiin puristuskuorman olevan keskeinen. Kun tiedetään, että kohdassa 6.3.1 tehdyn herkkyyssanalyysin perusteella C-paalun nurjahduskestävyys on herkkä kuorman epäkeskeisyyden suhteen, sisältyy taulukon 6.4 arvojen luotettavuuteen epävarmuutta kuorman mahdollisesta epäkeskeisyydestä. Puristuskestävyys on herkintä kuorman poiketessa painopisteestä y-suunnassa, joten esimerkiksi koekappaleen PJ1 tapauksessa kaavan (4.36) avulla saadaan teoreettiseksi myötökuorman arvoksi koetulosta vastaava arvo 565,6 kN, kun kuorman epäkeskeisyys on $e_y > 2,3$ mm. Vastaavasti PJ2:n tapauksessa koetulos saavutetaan kuorman epäkeskeisyydellä $e_y > 1,6$ mm ja PJ3:n tapauksessa epäkeskeisyydellä $e_y > 2,4$ mm. Tulosten luotettavuuteen sisältyy epävarmuutta myös teräksen myötörajan vaihtelusta (variaatiokerroin 2,3 %) ja mittalaitteiston mittausvirheistä ($< 0,5$ %), mutta merkittävin epävarmuus aiheutuu kuorman epäkeskeisyydestä. Kun otetaan huomioon, että lasketut kuorman epäkeskeisyyden arvot ovat pieniä ja ne voisivat helposti aiheutua koekappaleiden geometrisista poikkeamista tai kuormitusjärjestelyistä, vastaavat taulukon koetulokset hyvin teoreettisia arvoja. Käytännössä C-paaluun ei kohdistu koskaan täysin keskeistä kuormaa ja koska C-paalu on herkkä kuorman epäkeskeisyydelle, tulisi puristuskestävyys

tarkistaa kaavoilla (4.26) tai (4.36) eri kuorman epäkeskeisyyksiä käyttäen. Kohdan 4.2.2 jatkoksen puristuskestävyyttä käsittelevässä osassa ehdotettiin, että jatkettavien C-paalujen väliin asennettaisiin tiivisterengas, jonka avulla kuorma välittyisi suoraan paalulta toiselle niiden välisen kontaktin avulla eikä holkkijatkoksen hitsien kautta. Kokeissa jatkettujen C-paalujen välille jääneellä raolla eikä kuvan 5.34 mukaisesti hitsattujen koekappaleiden hitseillä, jotka kestivät puristuskokeet murtumatta, ollut vaikutusta myötökuormien arvoihin. Näin ollen kokeiden perusteella tiivisterengas ei ole tarpeellinen, mutta käyttämällä tiivisterengasta puristava kuorma siirtyisi mahdollisesti tasaisemmin paalulta toiselle. Jatkoksen puristuskokeissa suurin paalujen välinen rako oli ainoastaan 1,1 mm, joten jatkossa tulisi suorittaa puristuskokeita, joissa jatkettavien C-paalujen välinen rako on suurempi. Myös tiivisterenkaan käyttöä ja sen vaikutusta tulisi tutkia jatkossa puristuskokeiden avulla.

C-paalun nurjahduskestävyys

Taulukossa 6.5 on vertailtu teoreettisia ja kokeellisia jatkamattomien (N1...N3) ja jatkettujen (NJ1...NJ3) C-paalujen nurjahduskestävyyksien arvoja. Teoreettiset nurjahduskestävyyden arvot on laskettu koekappalekohtaisesti Vlasovin taivutusvääntönurjahdusteorian avulla kaavoilla (4.29) ja (4.36) käyttäen kohdassa 6.1.1 esitetyllä tavalla skaalattuja poikkileikkaussuureita ja olettaen, että jatkoksella ei ole vaikutusta nurjahduskestävyyteen. Laskelmissa on huomioitu koekappaleiden alkukaarevuudet käyttämällä niiden arvoja puristuskuorman epäkeskeisyytenä. Nurjahduskokeiden tuentatavan ja aiemmin kuvassa 4.8 esitettyjen nurjahduksen perustapausten mukaan nurjahduspi-tuuksina käytettiin arvoja

$$L_n = L_v = L_w = L_\varphi = 0,5 \times 4000 \text{ mm} = 2000 \text{ mm}.$$

Kaavoissa (4.29) ja (4.36) käytettiin kohdan 5.2 metallien vetokokeiden perusteella saatua myötörajan ja kimmokertoimen keskiarvoja $f_{y,tod} = 414,5 \text{ MPa}$ ja $E_{tod} = 205,8 \text{ GPa}$.

Taulukko 6.5. Nurjahduskestävyyden teoreettisten arvojen ja koetulosten vertailu.

Tunnus	Alkukaarevuus		Nurjahduskuorma [kN]		Suhteellinen poikkeama
	e_y [mm]	e_z [mm]	Teoreettinen arvo	Koetulos	
N1	-5,0	-4,0	263,93	239,90	-9,10 %
N2	-6,0	-4,5	256,34	214,79	-16,21 %
N3	-3,5	-4,5	268,56	241,68	-10,01 %
NJ1	0,0	-3,0	278,26	245,50	-11,77 %
NJ2	-4,5	-4,5	261,81	227,18	-13,23 %
NJ3	-1,5	-2,0	274,02	243,45	-11,16 %
Keskiarvo	-3,42	-3,75	267,15	235,42	-11,91 %
Keskihajonta	2,27	1,04	8,10	11,99	2,54 %
Variaatiokerroin	-66,37 %	-27,65 %	3,03 %	5,09 %	

Taulukossa 6.5 esitettyjen C-paalun nurjahduskokeiden perusteella määritetyt nurjahduskuorman arvot ovat keskimäärin 11,91 % teoreettisia arvoja pienempiä. Jatkamattomien koekappaleiden kokeellisesti määritetyt nurjahduskestävyydet poikkesivat niitä

vastaavista teoreettisista arvoista keskimäärin -11,77 % kun jatkettut C-paalut poikkesivat keskimäärin -12,05 %. Koetulosten poikkeamat ovat lähes yhtä suuret vaikka teoreettiset nurjahduskestävyydet laskettiin jättäen holkkijatkos huomioimatta, joten koetulosten perusteella jatkoksella ei ole merkittävää vaikutusta C-paalun nurjahduskestävyyteen. Jatkoksen taivutuskokeissa jatkettun C-paalun jäykkyydeksi saatiin suurempi arvo kuin jatkamattomalle C-paalulle, jolloin holkkijatkoksella pitäisi nostaa C-paalun nurjahduskestävyyttä.

Nurjahduskokeiden tulokset vaihtelivat taulukon 6.5 arvojen mukaan variaatiokertoimella 5,09 %. Koetulosten sisäinen vaihtelu on pientä, kun ottaa huomioon kaikki nurjahduskestävyyden määrittämiseen liittyvät epävarmuustekijät. Kohdassa 6.3.1 tehdyn herkkyyksianalyysin perusteella tiedetään, että C-paalun nurjahduskestävyys on herkkä kuorman epäkeskeisyydelle. Kun taulukkoon 6.2 sijoitetaan nurjahduspituudeksi nurjahduskokeissa käytetty arvo $L_n = 2000$ mm, saadaan nurjahduskestävyyden arvojen luotettavuuteen vaikuttavaksi epävarmuudeksi kuorman eri epäkeskeisyyksillä:

Kuorman epäkeskeisyys e_P	Poikkeamien vaihteluväli (epävarmuus)
2,50 mm	-5,24 % ... +5,59 %,
3,33 mm	-6,92 % ... +7,55 %,
4,00 mm	-8,24 % ... +9,15 %,
6,67 mm	-15,26 % ... +15,87 %.

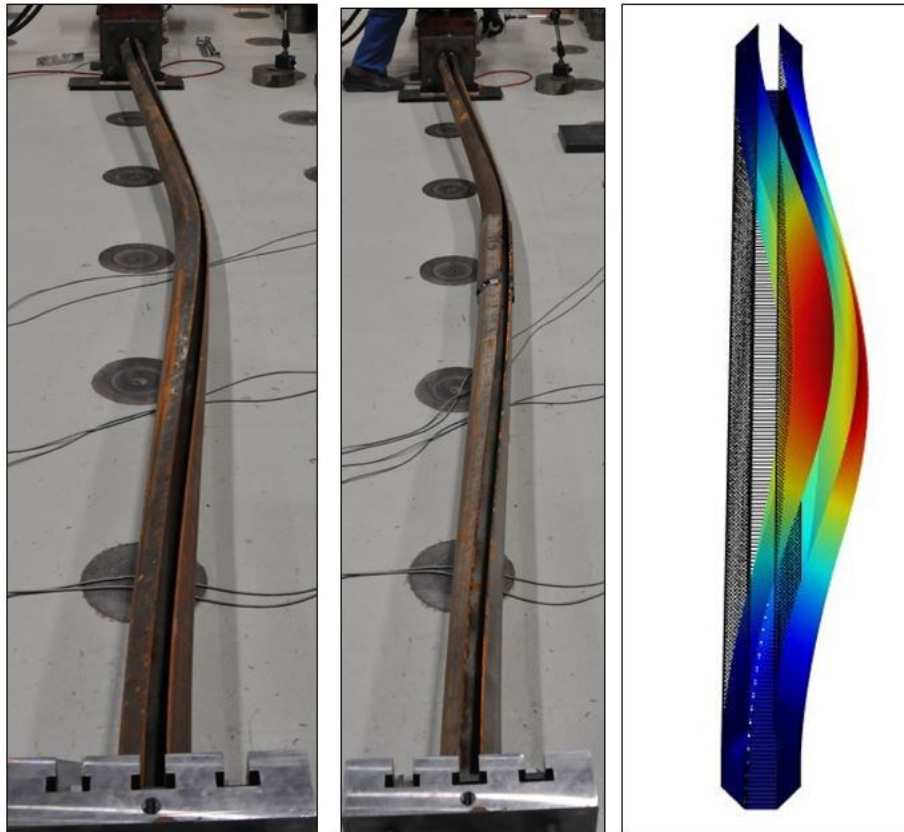
Epäkeskeisyyden aiheuttama epävarmuuden arvoista nähdään, että jo 2,5 mm epäkeskeisyys voi vaikuttaa yli ± 5 % nurjahduskestävyyden arvoon. Vaikka taulukon 6.5 teoreettisissa nurjahduskestävyyden arvoissa huomioitiin koekappaleiden alkukaarevuudesta aiheutuva kuorman epäkeskeisyys, on todellinen kuorman epäkeskeisyys saattanut poiketa laskennassa käytetyistä arvoista. Todelliseen kuorman epäkeskeisyyteen on voinut vaikuttaa esimerkiksi koekappaleen pään ja kuormituslaitteiston välisen kulman poikkeaminen. Esimerkiksi tilanteessa, jossa kuormituslaitteisto olisi $0,1^\circ$ vinossa C-paalun pituusakseliin nähden, olisi kulman poikkeamisesta aiheutuva kuorman epäkeskeisyys koekappaleen puolella välissä ($x = 2000$ mm) 3,5 mm, jolloin se vaikuttaisi yli ± 7 % nurjahduskestävyyden arvoon.

Taulukon 6.5 arvojen luotettavuuteen aiheutuu epävarmuutta mittauslaitteiston mittausvirheestä $< 0,5$ % sekä teräksen myötörajan ja kimmokertoimen vaihteluista variaatiokertoimilla 2,3 % ja 1,1 %. Tulosten luotettavuuteen vaikuttaa myös, kuinka koekappaleiden tuenta nurjahduskokeissa vastasi teoreettisissa laskelmissa käytettyä täysin jäykkää tuenta. Jos tuki ei olisi ollut kokeissa täysin jäykkä, olisi nurjahduspituus ollut pidempi. Pidempi nurjahduspituus johtaisi pienempään teoreettiseen nurjahduskestävyyden arvoon, jolloin taulukon 6.5 arvot olisivat olleet lähempänä toisiaan. Kohdassa 4.2.2 tutkittiin C-paalujen pituussuuntaisen katkohaitsin vaikutusta nurjahduskestävyyteen ja saatiin tulokseksi, että hitsaamalla C-paalun levyosat yhteen 40 mm katkohaitsillä vähintään 60 mm välein saavutetaan vähintään 99 % ehjän paalun nurjahduskestävyydestä, kun nurjahduspituus $L_n > 1000$ mm. Nurjahduskokeissa käytetyt C-paalut oli hitattu keskimäärin käyttäen 40 mm pituisia katkohaitsia 50 mm välein, jolloin kuvan

4.11 perusteella koekappaleet poikkeavat katkohitseistä johtuen teoreettisista nurjahduskestävyyden arvoista ainoastaan -0,7 %.

Vaikka kokeellisesti määritetyt nurjahduskuorman arvot poikkesivat taulukon 6.5 mukaan teoreettisista arvoista, voidaan Vlasovin taivutusvääntönurjahdusteoriolla laskea C-paalun nurjahduskestävyyden ominaisarvo, kun otetaan huomioon kaikki nurjahtamiseen liittyvät epävarmuustekijät. C-paalun nurjahduskestävyys on herkinä kuorman epäkeskeisyydelle, joten laskettaessa C-paalun nurjahduskestävyyttä on kuorman epäkeskeisyyden suhteen otettava mukaan lisävarmuutta. C-paalun nurjahduskokeita voidaan pitää lähes ideaalitulanteena epävarmuustekijöiden suhteen verrattuna käytännön tilanteeseen, jossa C-paalua kuormitetaan maassa. Aksiaalisesti kuormitetun porapaalun nurjahdustarkastelussa RIL:n Paalutusohjeessa PO-2011 suositeltavista alkutaipuman arvoista olisi C-paalun kannalta varmintä käyttää suurinta arvoa ($L_n / 300$), jolloin taulukon 6.2 mukaan n. ± 15 % epävarmuus olisi huomioituna nurjahduskestävyydessä.

Taulukossa 4.10 vertailtiin FEM-menetelmällä kuorielementtejä käyttäen määritettyjä C-paalun nurjahduskestävyyden arvoja Vlasovin teoriolla laskettuihin. Vertailun perusteella FEM-menetelmällä saatiin 1,0–3,8 % Vlasovin teoriaa pienempiä arvoja, kun C-paalu oli hitsattu pituussuunnassa katkohitsillä 40(60), joten Vlasovin taivutusvääntönurjahdusteorian lisäksi C-paalun nurjahduskestävyys voidaan määrittää FEM-menetelmän avulla kuorielementtejä käyttäen. Kuvassa 6.4 on vertailtu COMSOL -ohjelmalla määritetyn keskeisesti puristetun C-paalun nurjahdusmuotoa nurjahduskoekappaleiden N1 ja NJ1 nurjahdusmuotoihin. Kuvan 6.4 perusteella COMSOL -ohjelmalla saaduilla tuloksilla C-paalu menettää stabiiliutensa taivutusvääntönurjahtamalla kuten koekappaleet N1 ja NJ1. Laskentamallissa, joka on pituussuuntaista katkohitsiä lukuun ottamatta symmetrinen, C-paalun pituussuuntainen katkohitsi ohjaa taivutusvääntönurjahduksen kuvan 6.4 mukaisesti katkohitsistä poispäin. Nurjahduskokeissa kaikki koekappaleet lukuun ottamatta koekappaletta NJ3 nurjahtivat kuvan 6.4 mukaisesti pituussuuntaisesta katkohitsistä poispäin, joten katkohitsillä näyttäisi olevan vaikutusta taivutusvääntönurjahduksen suunnalle. On kuitenkin huomioitava, että nurjahtamisen suunnalle on kuorman epäkeskeisyydellä tai C-paalun alkukaarevuudella pituussuuntaista katkohitsiä suurempi.



Kuva 6.4. Koekappaleiden N1 ja NJ1 sekä FEM-mallin nurjahdusmuotojen vertailu.

COMSOL –ohjelman laskentamalli on tehty kohdan 4.2.2 *Laskentamalli* –kappaleen mukaisesti C-paalun valmistuskuvien mukaisia mittoja ja pituussuuntaista katkohitsiä 40(60) käyttäen. Elementtiverkon sivun maksimipituutena on käytetty arvoa 18,25 mm. Laskentamallin C-paalu on koekappaleiden tavoin päistään jäykästi tuettu ja pituudeltaan 4000 mm.

7 Johtopäätökset

Tutkimuksen päätavoitteena oli määrittää injektoimattoman C-paalun rakennetekninen kantavuus laskelmien ja koekuormitusten avulla mitoitusmenetelmien kehittämiseksi. Osatavoitteena oli tutkia C-paalun jatkostekniikkaa sekä jatkoksen kestävyyttä ja sen vaikutusta C-paalun rakennetekniseen toimintaan. Toisena osatavoitteena oli selvittää miten C-paalulle saadaan tuotehyväksyntä ja esittää tuotehyväksynnän liittyvät rakenteellisen kantokestävyyden kannalta olennaiset vaatimukset.

Rakennetekninen kantavuus

C-paalun rakenneteknistä kantavuutta tutkittiin Vlasovin ohutseinämäisiä avoprofiilisia kimmoisia sauvoja käsittelevällä teorialla määrittämällä poikkileikkaussuureet ja esittämällä laskentakaavat eri kuormitustapauksia varten. C-paalun stabiiliutta tutkittiin Vlasovin taivutusvääntönurjahdusteorian lisäksi FEM-menetelmällä kuorielementtejä käyttäen. Menetelmien avulla määritettiin keskeisen puristuskuorman tapauksessa C-paalun eri nurjahduspituuksia vastaavat puristuskestävyyden ominaisarvot. Stabiiliutta tutkittaessa selvitettiin pituussuuntaisen katkohaitsin vaikutusta C-paalun nurjahduskestävyyteen. Tulokseksi saatiin, että hitsaamalla C-paalun levyosat yhteen vähintään 40 mm pitkillä katkohaitsilla, joiden a-mitta on 6 mm ja käyttäen enintään 60 mm katkohaitsiväliä saavutetaan vähintään 99 % umpeen hitsatun C-paalun nurjahduskestävyydestä nurjahduspituuden ollessa yli 1000 mm. Vlasovin teorialla ja FEM-menetelmällä saadaan lähes samat nurjahduskestävyyden arvot. Vlasovin teorialla nurjahduskuormien arvot ovat 1.0–3,8 % suurempia kuin FEM-menetelmällä lasketut arvot.

C-paalun nurjahduskestävyyden herkkyyttä tutkittiin puristuskuorman epäkeskeisyyden suhteen. Herkkyyksianalyysin perusteella C-paalun nurjahduskestävyys on hyvin herkkä puristuskuorman epäkeskeisyydelle, etenkin kuorman vaikutuspisteen poiketessa C-paalun poikkileikkauksen y-suunnassa. C-paalun nurjahduskestävyys on herkintä kuorman epäkeskeisyydelle nurjahduspituuksilla 4–6 m, jolloin kuorman epäkeskeisyydellä 13–20 mm kriittinen nurjahduskuorma poikkeaa jopa ± 15 % keskeisesti puristetun C-paalun nurjahduskuormasta.

Teoreettisten ja koetulosten vertailun ja analysoinnin perusteella C-paalun teoreettinen taivutuskestävyyden arvo vastasi hyvin koetulosten arvoja taivutuskestävyyden kokeellisten arvojen ollessa keskimäärin ainoastaan 2,18 % teoreettisia arvoja suurempia. C-paalun nurjahduskestävyyden herkkyyys kuorman epäkeskeisyydelle on havaittavissa puristuskokeiden tuloksista. Koekappaleiden pituuden kasvaessa myös kuorman epäkeskeisyyteen vaikuttavien tekijöiden vaikutus kasvaa. Lyhyen C-paalun puristuskokeissa myötökuorman kokeelliset arvot olivat keskimäärin 7,2 % teoreettisia arvoja suurempia, kun taas jatkoksen puristuskokeiden kokeelliset arvot olivat keskimäärin 6,5 % teoreettisia arvoja pienempiä. Nurjahduskokeiden perusteella määritetyt nurjahduskestävyyden arvot olivat 11,9 % teoreettisia arvoja pienempiä. Laskettaessa C-paalun nurjahduskestävyyttä Vlasovin teorialla tai FEM-menetelmällä tulee kuorman epäkeskeisyyden suhteen ottaa mukaan lisävarmuutta. Aksiaalisesti kuormitetun porapaalun nurjahdustarkastelussa RIL:n Paalutusohjeessa 2011 suositeltavista alkutaipuman arvoista

olisi C-paalun kannalta varmintä käyttää suurinta arvoa ($L_n / 300$), jolloin ± 15 % epävarmuus olisi huomioituna nurjahduskestävyydessä.

C-paalun rakenteellista kantokestävyyttä verrattiin kokoluokaltaan vastaavan teräspu-
tkiprofiiliin puristus- ja taivutuskestävyyksien osalta, jotta jatkossa voitaisiin arvioida
injektoimattoman C-paalun kilpailukykyä. Teräspinta-alaltaan lähes samankokoisen
teräspu-
tkiprofiilin, jonka ulkohalkaisija on 90 mm ja seinämävahvuus 6 mm, taivutus-
kestävyys on 18,8 % C-paalun taivutuskestävyyden määräävää ominaisarvoa suurempi.
Nurjahduskestävyyksien välinen ero C-paalun ja putkiprofiilin välillä vaihtelee hyvin
paljon nurjahduspituudesta riippuen. C-paalun poikkileikkauksen avonaisuudesta johtu-
en on sen nurjahduskestävyyden arvo enimmillään jopa 54,1 % putkiprofiilia pienempi
nurjahduspituudella 2275 mm, mutta nurjahduspituuden kasvaessa ero poikkileikkauk-
sien välillä kapenee. Nurjahduskestävyyksien vertailun perusteella voidaan sanoa, että
C-paalu on sitä kannattavampi, mitä pidempi nurjahduspituus kuormitusstilanteessa on
kyseessä.

Korroosiosta aiheutuvaa paksuuden ohenemista ei ole huomioitu rakenneteknisen kan-
tavuuden määrittämisessä. Tavanomaisissa olosuhteissa korroosiovaraksi suositellaan
valittavaksi vähintään 1,2 mm sadassa vuodessa paalun käyttöpinoilla. Mikäli C-
paalua ei injektoida, pääsee korroosio aiheuttamaan teräksen ohenemista sekä sisä- että
ulkopuolelta, jolloin C-paalun seinämävahvuus 6 mm olisi sadan vuoden päästä enää 60
% alkuperäisestä. (RIL 254-1-2011, kohta 4.7.6.1). Jatkossa tulisi laskea kantokestä-
vyyden arvot huomioiden korroosiosta aiheutuvat seinämäpaksuuden ohenemiset.
Vaikka injektoinnin vaikutusta C-paalun kantokestävyyteen ei ole vielä tutkittu, voitai-
siin injektoinnilla vähentää korroosion vaikutusta ja siten parantaa C-paalun kantokes-
tävyysominaisuuksien säilymistä. Injektointi voisi auttaa myös C-paalun nurjahduskes-
tävyyteen, sillä injektoitu C-paalu ei ole enää täysin avoin poikkileikkaus.

Jatkostekniikka

Taivutuskokeiden perusteella selvisi, että holkkijatkokset tulee hitsata C-paaluun sär-
mille sijoitettavien katkohitsien lisäksi myös paalun pituussuunnassa, jotta jatkun C-
paalun pää ei pääse liukumaan ulos holkkijatkoksen sisältä (kuva 5.22). Taivutuskokei-
den perusteella holkkijatkokset, jotka hitsataan sekä särmiltä että pituussuunnassa ku-
vassa 5.15 esitetyn koekappaleen TJ4 tavoin, toteuttavat jatkoksen taivutusjäykkyyttä
koskevat standardin vaatimukset. Standardin mukaan jatkoksen taivutuskestävyys tulisi
olla vähintään yhtä suuri kuin paalun varsiosan taivutuskestävyys. Taivutuskokeiden
perusteella jatkosten taivutuskestävyydet olivat keskimäärin 0,04 % teoreettisia arvoja
pienempiä, joten vaatimus ei aivan toteutunut. Koetuloksiin sisältyi kuitenkin epävar-
muustekijöitä ja koska ero kokeellisen ja teoreettisen arvon välillä oli hyvin pieni, tulisi
jatkossa suorittaa lisätutkimuksia jatkoksen taivutuskestävyyden suhteen.

Nurjahduskokeiden perusteella holkkijatkoksilla, jotka on hitsattu katkohitsillä kuvan
5.26 mukaisesti, ei ole vaikutusta nurjahduskestävyyteen, jolloin C-paalun nurjahdus-
kestävyyttä laskettaessa voidaan holkkijatkos jättää huomioimatta. Jatkoksen puristus-

kokeissa tutkittiin jatkettavien paalujen välille mahdollisesti asennuksen aikana jäävän raon vaikutusta. Kokeissa holkkijatkoksen hitsit joustivat ja paalun päiden välinen rako painui umpeen, jonka jälkeen koekappaleet myötivät holkkijatkoksen ulkopuolelta. Jatkoksen puristuskokeiden mukaisissa tilanteissa, joissa jatkettavien paalujen välinen rako oli enimmillään 1,1 mm, ei aiemmin kohdassa 4.2.2 ehdotettu jatkettavien paalujen välille asennettava tiivisterengas ole välttämätön.

Jatkoksen vetokokeiden avulla tutkittiin toteuttaako holkkijatkos, joka on hitsattu samalla periaatteella kuin standardien taivutusjäykkyyden vaatimukset täyttävä holkkijatkos, standardeissa paalun jatkoksen vetokestävyydelle esitetyn vaatimuksen. Kokeiden perusteella C-paalujen holkkijatkokset, jotka hitsataan vähintään kuvassa 5.39 esitetyn koekappaleen VJ1 tavoin, toteuttavat standardissa paalun jatkoksen vetokestävyydelle asetetun vaatimuksen. C-paalun jatkoksen veto- ja taivutuskokeiden perusteella holkkijatkos suositellaan hitsattavan vähintään taivutuskoe-kappaleen TJ4 mukaisesti, jolloin se täyttää standardien mukaiset taivutusjäykkyyttä ja vetokestävyyttä koskevat vaatimukset. Teoreettisten arvojen perusteella pienempikin hitsimäärä voisi riittää, mutta käytännössä huomattiin, että alle 10 mm katkohitsien hitsaaminen on vaikeaa ilman, että hitsien laatu kärsii.

C-paalun tuotehyväksyntä

Rakennustuotteille, joille on olemassa harmonisoitu tuotestandardi, on tuotehyväksyntä haettava CE-merkinnän avulla. C-paalu kuuluu harmonisoidun tuotestandardin EN 1090-1 piiriin, joka tulee pakolliseksi standardin siirtymäajan päätyttyä 1.7.2014. CE-merkintää varten tarvittavien C-paalun rakenneteknisten kantokestävyyksien laskennallisten ja kokeellisten arvojen tulee olla soveltuvien eurokoodien mukaisia. Koekuormituksissa käytetyt C-paalut eivät toteuttaneet niille työn taulukossa 3.4 esitettyjä CE-merkinnän kannalta olennaisia geometrisia toleransseja ulkohalkaisijan *DI* osalta. Vaikka geometriset toleranssit toteuttivatkin niille esitetyt raja-arvot muiden mittojen osalta, olivat valmistetut C-paalut todellisilta mitoiltaan pienempiä kuin valmistuskuvissa, jolloin teoreettiset kantokestävyysarvot antoivat todellisuutta suurempia kestävyysarvoja. Jotta toleranssit jatkossa toteutuisivat, on vaihtoehtoina muuttaa tuotantoa siten, että valmistettavat C-paalut vastaavat valmistuskuvien mukaisia mittoja tai muuttaa valmistuskuvia siten, että ne täsmäävät tuotettujen C-paalujen mittoja.

Lähdeluettelo

Euroopan komissio, 2011. CE marking makes Europe's market yours. Euroopan unioni, 2011. 7 s. ISBN 978-92-79-15674-8. Ladattavissa:

http://ec.europa.eu/enterprise/policies/single-market-goods/cemarking/downloads/ce_brochure_en.pdf

Euroopan komission ylläpitämä Nando-sivusto. Harmonisoitujen tuotestandardien siirtymäaikaisten alkamispäivät. Käyty 1.10.2013.

<http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/nando/index.cfm?fuseaction=cpd.hs#>

Euroopan komission ylläpitämä Nando-sivusto. Maakohtaiset ilmoitetut laitokset. Käyty 2.10.2013.

<http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/nando/index.cfm?fuseaction=cpd.hs#>

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 305/2011, rakennustuotteiden kaupan pitämistä koskevien ehtojen yhdenmukaistamista ja neuvoston direktiivin 89/106/ETY kumoamisesta.

Fleming, K & Weltman, A & Randolph, M & Elson, K. Piling Engineering. 1992. 2. painos. Glasgow: Blackie A & P. 390 s. ISBN 0-7514-0194-3.

Geologian tutkimuskeskus. 2012. Happamat sulfaattimaat - riskit ja kartoitus. [Verkkojulkaisu]. Käyty 11.3.2014.

<http://www.gtk.fi/tutkimus/tutkimusohjelmat/yhdyskuntarakentaminen/sulfaattimaat.html>

Jääskeläinen, R. 2009. Pohjarakennuksen perusteet. 1. painos. Tampere: Tammertekniikka. 233 s. ISBN 978-952-5491-51-7.

Laki eräiden rakennustuotteiden tuotehyväksynnästä 21.12.2012/954. Saatavissa:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2012/20120954>

Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132. Saatavissa:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#a21.12.2012-958>

NA SFS-EN 1993-5. Kansallinen liite standardiin ”SFS-EN 1993-5. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 5: Paalut”. Ympäristöministeriön asetus Eurocode – standardien soveltamisesta talonrakentamisessa annetun asetuksen muuttamisesta. Liite 30. Helsinki: Ympäristöministeriö. 2009. 5 s. Ladattavissa:

<http://www.eurocodes.fi/1993/1993-5/NA%20SFS-EN%201993-5-YM.pdf>

Poulos, H.G. & Davis, E.H. 1980. Pile Foundation Analysis and Design. New York: Wiley. 397 s. ISBN 0-471-02084-2.

Rakennustuoteteollisuus RTT ry, Teollisuuden ja viranomaisten edustajain asiantuntijaryhmä. 2013. CE-merkittyjen rakennustuotteiden oikea käyttö. Helsinki: Suomen Rakennusmedia Oy. 48 s. ISBN 978-952-269-096-8.

Rantamäki, M & Tammirinne, M. 1984. Pohjarakennus 465. Espoo: Otakustantamo. 228 s. ISBN 951-671-265-7.

RIL 230-2007. Pienpaalutusohje PPO-2007: teräksiset lyönti-, pora- ja puristuspaalut. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto, Suomen geoteknillinen yhdistys. 2007. 226 s. ISBN 978-951-758-469-2.

RIL 254-2011. Paalutusohje 2011, PO-2011. Osa 1: Suunnittelun perusteet. Osa 2: Paalutusohja. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. 2011. 261 s. ISBN 978-951-758-528-6.

SFS-EN 1090-1. Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 1: Vaatimukset rakenteellisten kokoonpanojen vaatimustenmukaisuuden arviointiin. 2. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 2012. 72 s.

SFS-EN 1090-2. Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 2012. 198 s.

SFS-EN 1992-1-1. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 2005. 218 s.

SFS-EN 1993-1-1. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 2005. 99 s.

SFS-EN 1993-1-3. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 2006. 127 s.

SFS-EN 1993-1-8. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 2005. 148 s.

SFS-EN 1993-5. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 5: Paalut. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 2007. 88 s.

SFS-EN ISO 6892-1. Metallien vetokoe. Osa 1: Vetokoe huoneenlämpötilassa. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 2009. 123 s.

SFS-EN 10025-4. Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 4: Termomekaanisesti valssatut hitsattavat rakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 2005. 45 s.

SFS-EN 10149-1. Kuumavalssatut lujat kylmämuovattavat teräslevytuotteet. Osa 1: Yleiset toimitusehdot. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 1996. 19 s.

SFS-EN 10149-2. Kuumavalssatut lujat kylmämuovattavat teräslevytuotteet. Osa 2: Termomekaanisesti valssattujen terästen toimitusehdot. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto (SFS). 1996. 13 s.

Timoshenko, S. 1961. Theory of Elastic Stability. 2. painos. New York: McGraw-Hill. 541 s.

Leino, T. 1998. Teräsrakenteiden käyttöikäsuunnittelu. Espoo: VTT. 119 s. ISBN 951-38-5408-6. Ladattavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1937.pdf>

Vlasov, V.Z. 1963. Thin-Walled Elastic Beams. 2. painos. Lontoo: Humphrey. 493 s.

Winterkorn, H.F. & Fang, H.Y. 1975. Foundation Engineering Handbook. 1. painos. New York. 751 s. ISBN 0-442-29564-2.

Liiteluettelo

- Liite 1. C-paalun alkutestauksen näytteenotto ja arviointi. 1 sivua.
- Liite 2. Tehtaan sisäisen laadunvalvonnan sisältämän tuotetestauksen taajuus. 1 sivua.
- Liite 3. Poikkileikkaussuureiden laskenta. 14 sivua.
- Liite 4. C-paalun teräslevyjen ja hitsausaineen ainestodistukset. 3 sivua.
- Liite 5. Lyhyen C-paalun puristuskokeiden koekappaleiden mittatiedot. 6 sivua.
- Liite 6. Taivutuskokeiden koekappaleiden mittatiedot. 11 sivua.
- Liite 7. Nurjahduskokeiden koekappaleiden mittatiedot. 9 sivua.
- Liite 8. Nurjahduskokeiden mittaustulokset. 7 sivua.
- Liite 9. Jatkoksen puristuskokeiden koekappaleiden mittatiedot. 6 sivua.
- Liite 10. Jatkoksen vetokokeiden koekappaleiden mittatiedot. 6 sivua.
- Liite 11. Epäkeskeisyyden vaikutus nurjahduskestävyyteen. 1 sivu.

Liite 1. C-paalun alkutestauksen näytteenotto ja arviointi

C-paalun alkutestaus ja näytteenotto standardissa SFS-EN 1090-1 esitetyn taulukon 1 mukaisesti.

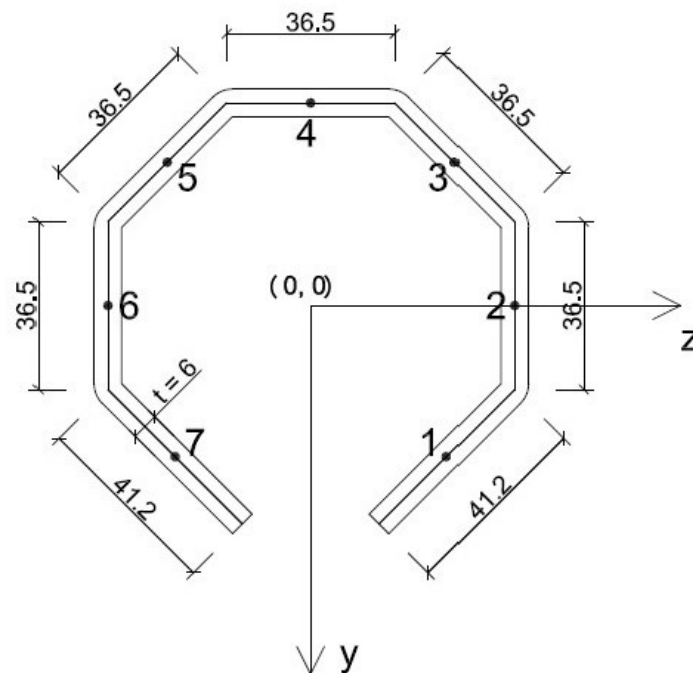
Toiminnallinen ominaisuus		Arviointimenetelmä	Näytteiden lukumäärä
Mittojen ja muotojen toleranssit		Tarkastus ja testaus standardin EN 1090-2 mukaan	1
Hitsattavuus		Käytettäville tuotteille asetettujen vaatimusten tarkistus ainestodistuksen perusteella	1
Murtumissitkeys		Käytettäville tuotteille asetettujen vaatimusten tarkistus ainestodistuksen perusteella	1
Iskunkestävyys		Arviointi murtumissitkeyden perusteella	1
Rakenteelliset ominaisuudet	Kantavuus	Soveltuvan standardin EN 1993 tai EN 1994 osan mukainen laskelma tai soveltuvan eurooppalaisen teknisen eritelmän mukainen testaus ^b Kokoonpanoeritelmän ja standardin EN 1090-2 mukainen valmistus ^c	1 ^a
	Väsymislujuus	Soveltuvan standardin EN 1993 tai EN 1994 osan mukainen laskelma ^b Valmistus kokoonpanoeritelmän ja standardin EN 1090-2 mukaan ^c	1 ^a
	Palonkestävyys	Toiminnalliselle ominaisuudelle R standardien EN 1993 tai EN 1994 mukainen laskelma tai standardin EN 13501-2 mukainen testaus ja luokitus toiminnallisille ominaisuuksille R, E, I ja/tai M ^b Valmistus kokoonpanoeritelmän ja standardin EN 1090-2 mukaan ^c	1 ^a
	Muodonmuutos käyttörajatilassa	Soveltuvan standardin EN 1993 tai EN 1994 osan mukainen laskelma tai soveltuvan eurooppalaisen teknisen eritelmän mukainen testaus ^b Kokoonpanoeritelmän ja standardin EN 1090-2 mukainen valmistus ^c	1 ^a
Palokäyttäytyminen		Pinnoitettujen kokoonpanojen tarkistaminen standardin EN 13501-1 mukaisesti	1
Vaaralliset aineet		Käytettävien tuotteiden tarkistaminen eurooppalaisten standardien mukaisesti	1
Säilyvyys		Pinnan esikäsittelyn toteuttaminen kokoonpanoeritelmän ja standardin EN 1090-2 mukaan	1
^a Yhden laskelman tulee riittää vaatimustenmukaisuuden arviointiin. Jos ominaisuus määritetään testeillä, koekappaleiden lukumäärä tulee valita standardeissa EN 1990, EN 1993 ja EN 1994 ja koetulosten arvioinnille esitettyjen ohjeiden mukaan.			
^b Jos valmistaja ilmoittaa rakenteellisen suunnittelun perusteella määritettyjä ominaisuuksia.			
^c Alkutestauksen kohteena olevan toteutusluokan mukaisesti.			

Liite 2. Tehtaan sisäisen laadunvalvonnan sisältämän tuotetestauksen taajuus

Tehtaan sisäisen laadunvalvonnan sisältämän tuotetestauksen taajuus teräskokoonpanoille (SFS-EN 1090-1, taulukko 2)

Toiminnallinen ominaisuus		Arviointimenetelmä	Näytteenotto
Mittojen ja muotojen toleranssit		Tarkastus ja testaus standardin EN 1090-2 mukaisesti	Jokainen kokoonpano ^a
Hitsattavuus		Käytettäville tuotteille asetettujen vaatimusten tarkistus ainestodistuksen perusteella	Kaikkien valmistuksessa käytettävien tuotteiden dokumenttien tarkistus
Murtumissitkeys /haurasmurtumislujuus + Iskun kestävyys ^b			
Valmistuksessa käytettävien tuotteiden myötölujuus, suhteellisuusraja tai murtolujuus			
Rakenteelliset ominaisuudet	Kantavuus		
	Väsymislujuus		
	Palonkestävyys		
	Muodonmuutos käyttö-rajatilassa		
Valmistuksen perusteella määräytyvät rakenteelliset ominaisuudet		Tarkistetaan, että valmistus tehdään kokoonpanoeritelmän ja standardin EN 1090-2 mukaisesti Vaatimustenmukaisuuskriteeri standardin SFS-EN 1090-1 kohdassa 5.6.3	Tarkistus standardin EN 1090-2 tarkastusta koskevien vaatimusten ja kokoonpanoeritelmän mukaisesti
Säilyvyys		Tarkistetaan, että valmistus tehdään kokoonpanoeritelmän ja standardin EN 1090-2 mukaisesti	Tarkistus standardin EN 1090-2 tarkastusta koskevien vaatimusten mukaisesti
^a Tätä vaatimusta voidaan lieventää, jos kokoonpanot valmistetaan samalla tavalla tai, jos geometria ei ole kriittinen tekijä niiden käytölle.			
^b Iskunkestävyys on aineominaisuus, joka ilmaisee samoja ominaisuuksia kuin murtumissitkeys. Sitä koskevia lisävaatimuksia ei käytetä (SFS-EN 1090-1, kohta 4.9) Terästuotteiden iskunkestävyys arvioidaan tuotteen murtumissitkeyden perusteella. (SFS-EN 1090-1, kohta 5.10)			

Liite 3. C-paalun poikkileikkaussuureiden määrittäminen



C-paalun pintakeskiön sijainnin määrittäminen (nurkkapyöristyksiä ei huomioida)

Seinämän vahvuus $t := 6\text{mm}$

Osien pituudet $s_1 := 41.2\text{mm}$ $s_2 := 36.5\text{mm}$

$s_3 := s_2$ $s_4 := s_2$ $s_5 := s_2$ $s_6 := s_2$ $s_7 := s_1$

Poikkipinta-ala $A_1 := s_1 \cdot t = 247.2\text{mm}^2$

$A_2 := s_2 \cdot t = 219\text{mm}^2$

$A_3 := s_3 \cdot t = 219\text{mm}^2$

$A_4 := s_4 \cdot t = 219\text{mm}^2$

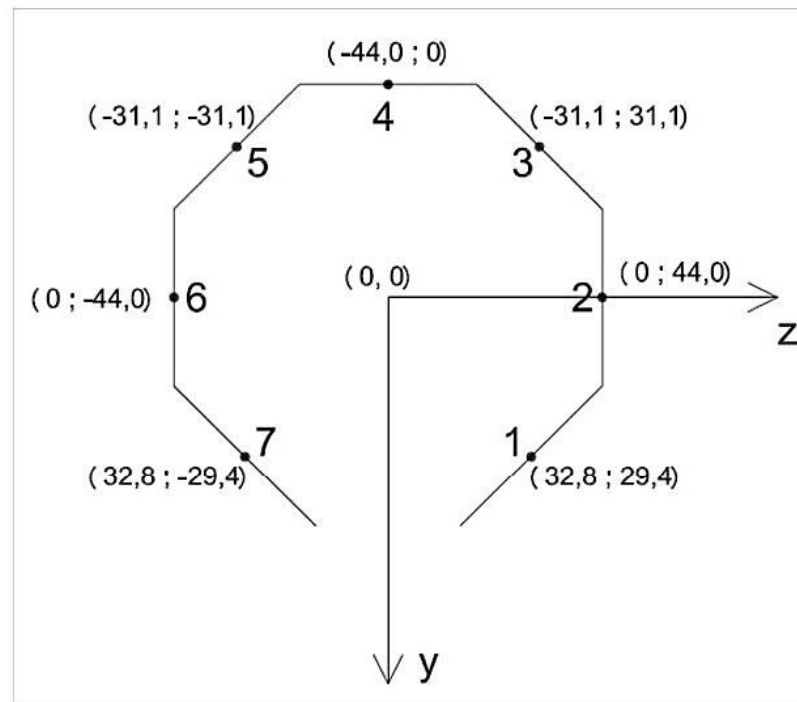
$A_5 := s_5 \cdot t = 219\text{mm}^2$

$A_6 := s_6 \cdot t = 219\text{mm}^2$

$A_7 := s_7 \cdot t = 247.2\text{mm}^2$

$A_p := A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 = 1589.4\text{mm}^2$

Piiri $s_p := s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + s_5 + s_6 + s_7 = 264.9\text{mm}$



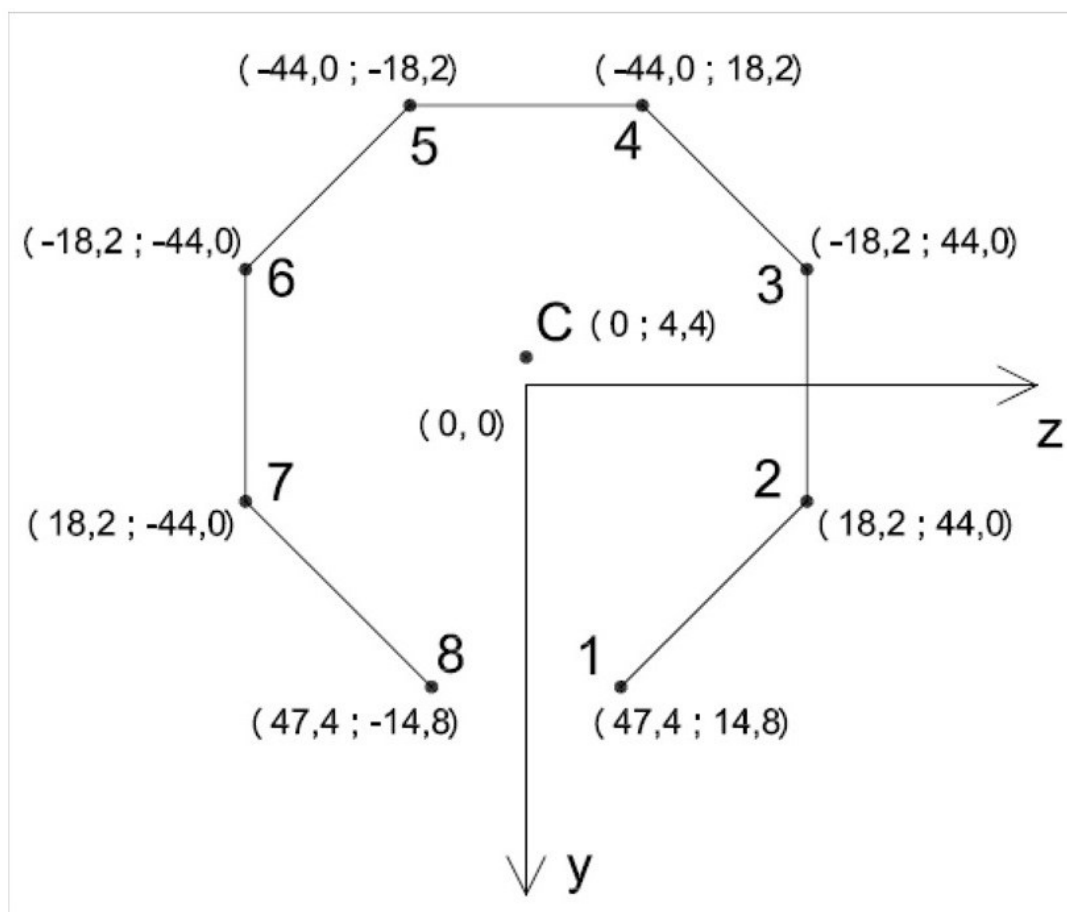
Osien painopisteiden koordinaatit:

$$\begin{aligned}
 e_{yp1} &:= 32.8\text{mm} & e_{zp1} &:= 29.4\text{mm} \\
 e_{yp2} &:= 0\text{mm} & e_{zp2} &:= 44\text{mm} \\
 e_{yp3} &:= -31.1\text{mm} & e_{zp3} &:= 31.1\text{mm} \\
 e_{yp4} &:= -44\text{mm} & e_{zp4} &:= 0\text{mm} \\
 e_{yp5} &:= -31.1\text{mm} & e_{zp5} &:= -31.1\text{mm} \\
 e_{yp6} &:= 0\text{mm} & e_{zp6} &:= -44\text{mm} \\
 e_{yp7} &:= 32.8\text{mm} & e_{zp7} &:= -29.4\text{mm}
 \end{aligned}$$

Painopisteen koordinaatit:

$$e_y := \frac{A_1 \cdot e_{yp1} + A_2 \cdot e_{yp2} + A_3 \cdot e_{yp3} + A_4 \cdot e_{yp4} + A_5 \cdot e_{yp5} + A_6 \cdot e_{yp6} + A_7 \cdot e_{yp7}}{A_p} = -4.43 \cdot \text{mm}$$

$$e_z := \frac{A_1 \cdot e_{zp1} + A_2 \cdot e_{zp2} + A_3 \cdot e_{zp3} + A_4 \cdot e_{zp4} + A_5 \cdot e_{zp5} + A_6 \cdot e_{zp6} + A_7 \cdot e_{zp7}}{A_p} = 0 \cdot \text{mm}$$



Nurkkapisteidien koordinaatit:

$e_{y1} := 47.4\text{mm}$	$e_{z1} := 14.8\text{mm}$
$e_{y2} := 18.2\text{mm}$	$e_{z2} := 44\text{mm}$
$e_{y3} := -18.2\text{mm}$	$e_{z3} := 44\text{mm}$
$e_{y4} := -44\text{mm}$	$e_{z4} := 18.2\text{mm}$
$e_{y5} := -44\text{mm}$	$e_{z5} := -18.2\text{mm}$
$e_{y6} := -18.2\text{mm}$	$e_{z6} := -44\text{mm}$
$e_{y7} := 18.2\text{mm}$	$e_{z7} := -44\text{mm}$
$e_{y8} := 47.4\text{mm}$	$e_{z8} := -14.8\text{mm}$

Siirretään koordinaatisto pintakeskiöön

Nurkkapisteiden etäisyydet painopisteestä:

$$y_1 := e_{y1} - e_y = 51.83 \cdot \text{mm} \quad z_1 := e_{z1} - e_z = 14.8 \cdot \text{mm}$$

$$y_2 := e_{y2} - e_y = 22.63 \cdot \text{mm} \quad z_2 := e_{z2} - e_z = 44 \cdot \text{mm}$$

$$y_3 := e_{y3} - e_y = -13.77 \cdot \text{mm} \quad z_3 := e_{z3} - e_z = 44 \cdot \text{mm}$$

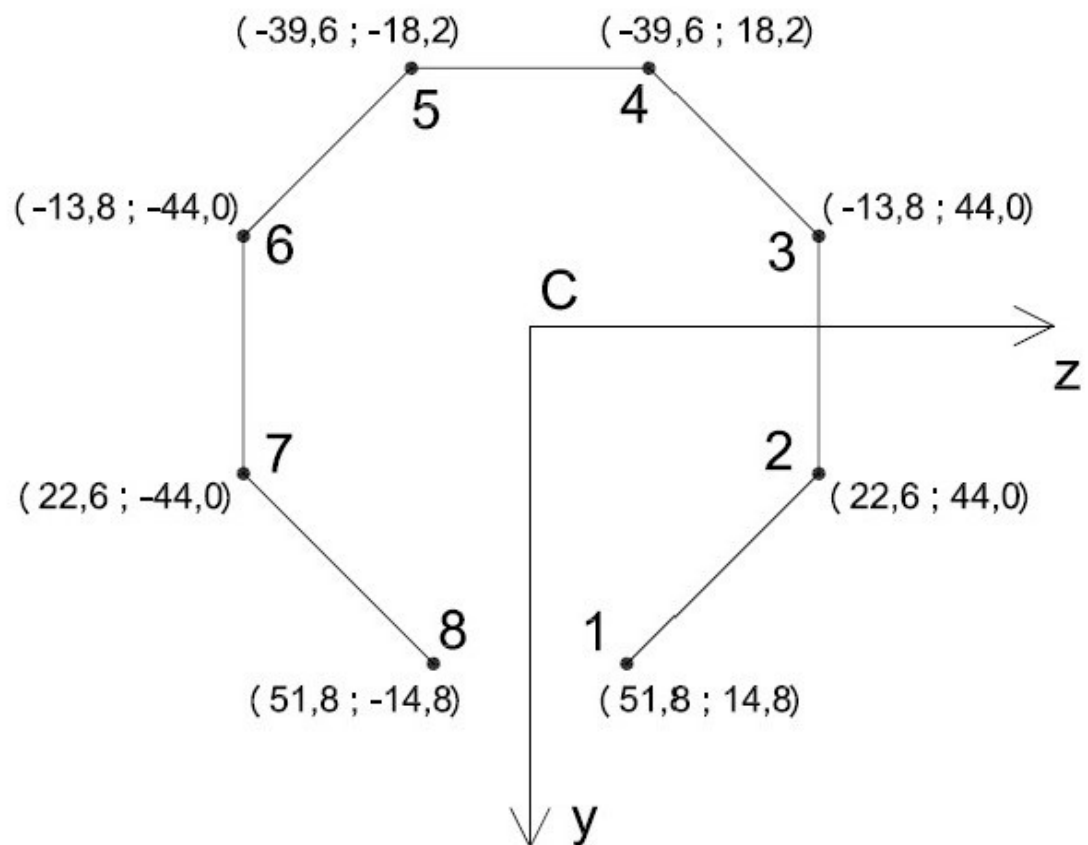
$$y_4 := e_{y4} - e_y = -39.57 \cdot \text{mm} \quad z_4 := e_{z4} - e_z = 18.2 \cdot \text{mm}$$

$$y_5 := e_{y5} - e_y = -39.57 \cdot \text{mm} \quad z_5 := e_{z5} - e_z = -18.2 \cdot \text{mm}$$

$$y_6 := e_{y6} - e_y = -13.77 \cdot \text{mm} \quad z_6 := e_{z6} - e_z = -44 \cdot \text{mm}$$

$$y_7 := e_{y7} - e_y = 22.63 \cdot \text{mm} \quad z_7 := e_{z7} - e_z = -44 \cdot \text{mm}$$

$$y_8 := e_{y8} - e_y = 51.83 \cdot \text{mm} \quad z_8 := e_{z8} - e_z = -14.8 \cdot \text{mm}$$



Lasketaan jäyhyysmomentit ja tulomomentti:

$$I_{y1} := t \cdot \frac{s_1}{3} \cdot (z_1^2 + z_1 \cdot z_2 + z_2^2) \quad I_{z1} := t \cdot \frac{s_1}{3} \cdot (y_1^2 + y_1 \cdot y_2 + y_2^2)$$

$$I_{y2} := t \cdot \frac{s_2}{3} \cdot (z_2^2 + z_2 \cdot z_3 + z_3^2) \quad I_{z2} := t \cdot \frac{s_2}{3} \cdot (y_2^2 + y_2 \cdot y_3 + y_3^2)$$

$$I_{y3} := t \cdot \frac{s_3}{3} \cdot (z_3^2 + z_3 \cdot z_4 + z_4^2) \quad I_{z3} := t \cdot \frac{s_3}{3} \cdot (y_3^2 + y_3 \cdot y_4 + y_4^2)$$

$$I_{y4} := t \cdot \frac{s_4}{3} \cdot (z_4^2 + z_4 \cdot z_5 + z_5^2) \quad I_{z4} := t \cdot \frac{s_4}{3} \cdot (y_4^2 + y_4 \cdot y_5 + y_5^2)$$

$$I_{y5} := t \cdot \frac{s_5}{3} \cdot (z_5^2 + z_5 \cdot z_6 + z_6^2) \quad I_{z5} := t \cdot \frac{s_5}{3} \cdot (y_5^2 + y_5 \cdot y_6 + y_6^2)$$

$$I_{y6} := t \cdot \frac{s_6}{3} \cdot (z_6^2 + z_6 \cdot z_7 + z_7^2) \quad I_{z6} := t \cdot \frac{s_6}{3} \cdot (y_6^2 + y_6 \cdot y_7 + y_7^2)$$

$$I_{y7} := t \cdot \frac{s_7}{3} \cdot (z_7^2 + z_7 \cdot z_8 + z_8^2) \quad I_{z7} := t \cdot \frac{s_7}{3} \cdot (y_7^2 + y_7 \cdot y_8 + y_8^2)$$

$$I_{yz1} := t \cdot \frac{s_1}{6} \cdot [z_1 \cdot (2 \cdot y_1 + y_2) + z_2 \cdot (y_1 + 2 \cdot y_2)] = 2.53 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{yz2} := t \cdot \frac{s_2}{6} \cdot [z_2 \cdot (2 \cdot y_2 + y_3) + z_3 \cdot (y_2 + 2 \cdot y_3)] = 42690.135 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{yz3} := t \cdot \frac{s_3}{6} \cdot [z_3 \cdot (2 \cdot y_3 + y_4) + z_4 \cdot (y_3 + 2 \cdot y_4)] = -1.695 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{yz4} := t \cdot \frac{s_4}{6} \cdot [z_4 \cdot (2 \cdot y_4 + y_5) + z_5 \cdot (y_4 + 2 \cdot y_5)] = 0 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{yz5} := t \cdot \frac{s_5}{6} \cdot [z_5 \cdot (2 \cdot y_5 + y_6) + z_6 \cdot (y_5 + 2 \cdot y_6)] = 1.695 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{yz6} := t \cdot \frac{s_6}{6} \cdot [z_6 \cdot (2 \cdot y_6 + y_7) + z_7 \cdot (y_6 + 2 \cdot y_7)] = -42690.135 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{yz7} := t \cdot \frac{s_7}{6} \cdot [z_7 \cdot (2 \cdot y_7 + y_8) + z_8 \cdot (y_7 + 2 \cdot y_8)] = -2.53 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

Jäyhyysmomentit:

$$I_y := I_{y1} + I_{y2} + I_{y3} + I_{y4} + I_{y5} + I_{y6} + I_{y7} = 1.783 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_z := I_{z1} + I_{z2} + I_{z3} + I_{z4} + I_{z5} + I_{z6} + I_{z7} = 1.456 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

Tulomomentti:

$$I_{yz} := I_{yz1} + I_{yz2} + I_{yz3} + I_{yz4} + I_{yz5} + I_{yz6} + I_{yz7} = 0 \cdot \text{mm}^4$$

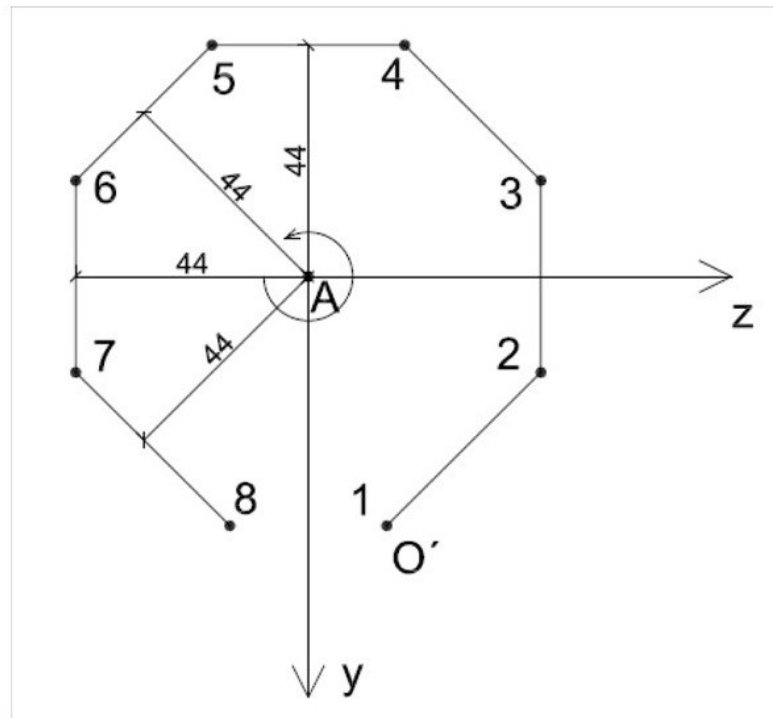
Sektoriaalinen koordinaatti ω_A' pisteissä 1-8:

$$y_A := -e_y = 4.43 \cdot \text{mm}$$

$$z_A := e_z = 0 \cdot \text{mm}$$

$$y'_0 := y_1 = 51.83 \cdot \text{mm}$$

$$z'_0 := z_1 = 14.8 \cdot \text{mm}$$



$$\omega'_{A1} := 0$$

$$\omega'_{A2} := \omega'_{A1} + s_1 \cdot 44 \text{mm} = 1812.8 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{A3} := \omega'_{A2} + s_2 \cdot 44 \text{mm} = 3418.8 \cdot \text{mm}^2$$

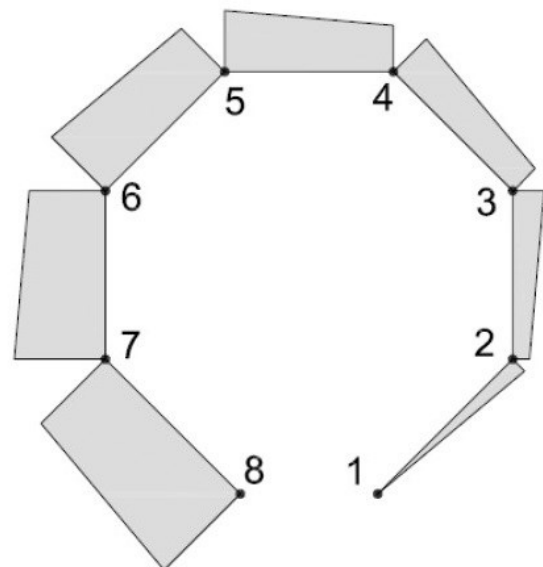
$$\omega'_{A4} := \omega'_{A3} + s_3 \cdot 44 \text{mm} = 5024.8 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{A5} := \omega'_{A4} + s_4 \cdot 44 \text{mm} = 6630.8 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{A6} := \omega'_{A5} + s_5 \cdot 44 \text{mm} = 8236.8 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{A7} := \omega'_{A6} + s_6 \cdot 44 \text{mm} = 9842.8 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{A8} := \omega'_{A7} + s_7 \cdot 44 \text{mm} = 11655.6 \cdot \text{mm}^2$$



Lasketaan sektoriaaliset tulomomentit:

$$I'_{y\omega.A1} := t \cdot \frac{s_1}{6} \cdot [\omega'_{A1} \cdot (2 \cdot y_1 + y_2) + \omega'_{A2} \cdot (y_1 + 2 \cdot y_2)] = 7.251 \times 10^6 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{y\omega.A2} := t \cdot \frac{s_2}{6} \cdot [\omega'_{A2} \cdot (2 \cdot y_2 + y_3) + \omega'_{A3} \cdot (y_2 + 2 \cdot y_3)] = 1.471 \times 10^6 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{y\omega.A3} := t \cdot \frac{s_3}{6} \cdot [\omega'_{A3} \cdot (2 \cdot y_3 + y_4) + \omega'_{A4} \cdot (y_3 + 2 \cdot y_4)] = -2.541 \times 10^7 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{y\omega.A4} := t \cdot \frac{s_4}{6} \cdot [\omega'_{A4} \cdot (2 \cdot y_4 + y_5) + \omega'_{A5} \cdot (y_4 + 2 \cdot y_5)] = -5.05 \times 10^7 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{y\omega.A5} := t \cdot \frac{s_5}{6} \cdot [\omega'_{A5} \cdot (2 \cdot y_5 + y_6) + \omega'_{A6} \cdot (y_5 + 2 \cdot y_6)] = -4.266 \times 10^7 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{y\omega.A6} := t \cdot \frac{s_6}{6} \cdot [\omega'_{A6} \cdot (2 \cdot y_6 + y_7) + \omega'_{A7} \cdot (y_6 + 2 \cdot y_7)] = 9.838 \times 10^6 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{y\omega.A7} := t \cdot \frac{s_7}{6} \cdot [\omega'_{A7} \cdot (2 \cdot y_7 + y_8) + \omega'_{A8} \cdot (y_7 + 2 \cdot y_8)] = 1 \times 10^8 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{y\omega.A} := I'_{y\omega.A1} + I'_{y\omega.A2} + I'_{y\omega.A3} + I'_{y\omega.A4} + I'_{y\omega.A5} + I'_{y\omega.A6} + I'_{y\omega.A7}$$

$$I'_{z\omega.A1} := t \cdot \frac{s_1}{6} \cdot [\omega'_{A1} \cdot (2 \cdot z_1 + z_2) + \omega'_{A2} \cdot (z_1 + 2 \cdot z_2)] = 7.678 \times 10^6 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{z\omega.A2} := t \cdot \frac{s_2}{6} \cdot [\omega'_{A2} \cdot (2 \cdot z_2 + z_3) + \omega'_{A3} \cdot (z_2 + 2 \cdot z_3)] = 2.521 \times 10^7 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{z\omega.A3} := t \cdot \frac{s_3}{6} \cdot [\omega'_{A3} \cdot (2 \cdot z_3 + z_4) + \omega'_{A4} \cdot (z_3 + 2 \cdot z_4)] = 2.8 \times 10^7 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{z\omega.A4} := t \cdot \frac{s_4}{6} \cdot [\omega'_{A4} \cdot (2 \cdot z_4 + z_5) + \omega'_{A5} \cdot (z_4 + 2 \cdot z_5)] = -1.067 \times 10^6 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{z\omega.A5} := t \cdot \frac{s_5}{6} \cdot [\omega'_{A5} \cdot (2 \cdot z_5 + z_6) + \omega'_{A6} \cdot (z_5 + 2 \cdot z_6)] = -5.139 \times 10^7 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{z\omega.A6} := t \cdot \frac{s_6}{6} \cdot [\omega'_{A6} \cdot (2 \cdot z_6 + z_7) + \omega'_{A7} \cdot (z_6 + 2 \cdot z_7)] = -8.711 \times 10^7 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{z\omega.A7} := t \cdot \frac{s_7}{6} \cdot [\omega'_{A7} \cdot (2 \cdot z_7 + z_8) + \omega'_{A8} \cdot (z_7 + 2 \cdot z_8)] = -7.703 \times 10^7 \cdot \text{mm}^5$$

$$I'_{z\omega.A} := I'_{z\omega.A1} + I'_{z\omega.A2} + I'_{z\omega.A3} + I'_{z\omega.A4} + I'_{z\omega.A5} + I'_{z\omega.A6} + I'_{z\omega.A7}$$

Sektoriaaliset tulomomentit:

$$I'_{y\omega.A} = 0 \cdot \text{mm}^5$$

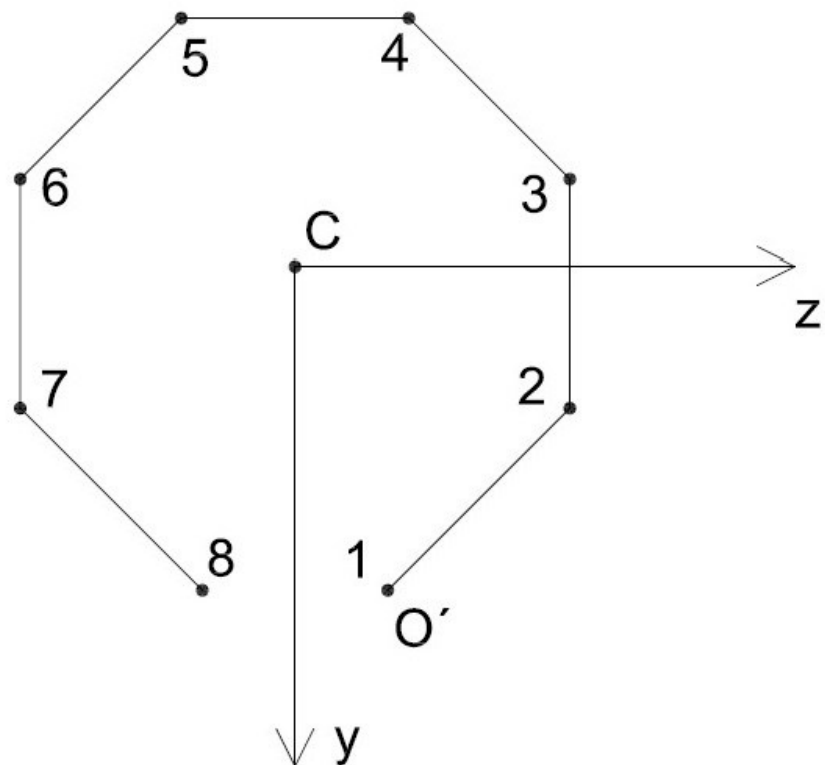
$$I'_{z\omega.A} = -1.557 \times 10^8 \cdot \text{mm}^5$$

Lasketaan vääntökeskiön koordinaatit:

$$y_V := y_A + \frac{I_z \cdot I'_{z\omega.A} - I_{yz} \cdot I'_{y\omega.A}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \quad y_V = -82.923 \cdot \text{mm}$$

$$z_V := z_A - \frac{I_y \cdot I'_{y\omega.A} - I_{yz} \cdot I'_{z\omega.A}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \quad z_V = 0 \text{ mm}$$

$$(-82,9 ; 0) \quad \bullet V$$



Määritetään seuraavaksi sektoriaalinen koordinaatti ω'_V , jonka nollapiste on O' ja napa on vääntökeskiö V:

$$\omega'_{V1} := \omega'_{A1} + (z_V - z_A) \cdot (y_1 - y'_0) - (y_V - y_A) \cdot (z_1 - z'_0) = 0 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{V2} := \omega'_{A2} + (z_V - z_A) \cdot (y_2 - y'_0) - (y_V - y_A) \cdot (z_2 - z'_0) = 4363.504 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{V3} := \omega'_{A3} + (z_V - z_A) \cdot (y_3 - y'_0) - (y_V - y_A) \cdot (z_3 - z'_0) = 5969.504 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{V4} := \omega'_{A4} + (z_V - z_A) \cdot (y_4 - y'_0) - (y_V - y_A) \cdot (z_4 - z'_0) = 5321.8 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{V5} := \omega'_{A5} + (z_V - z_A) \cdot (y_5 - y'_0) - (y_V - y_A) \cdot (z_5 - z'_0) = 3748.155 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{V6} := \omega'_{A6} + (z_V - z_A) \cdot (y_6 - y'_0) - (y_V - y_A) \cdot (z_6 - z'_0) = 3100.45 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{V7} := \omega'_{A7} + (z_V - z_A) \cdot (y_7 - y'_0) - (y_V - y_A) \cdot (z_7 - z'_0) = 4706.45 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega'_{V8} := \omega'_{A8} + (z_V - z_A) \cdot (y_8 - y'_0) - (y_V - y_A) \cdot (z_8 - z'_0) = 9069.954 \cdot \text{mm}^2$$

Sektoriaalisen staattisen momentin S'_{ω} määrittäminen

$$S'_{\omega.V1} := t \cdot \frac{s_1}{2} \cdot (\omega'_{V1} + \omega'_{V2}) = 5.393 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S'_{\omega.V2} := t \cdot \frac{s_2}{2} \cdot (\omega'_{V2} + \omega'_{V3}) = 1.131 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

$$S'_{\omega.V3} := t \cdot \frac{s_3}{2} \cdot (\omega'_{V3} + \omega'_{V4}) = 1.236 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

$$S'_{\omega.V4} := t \cdot \frac{s_4}{2} \cdot (\omega'_{V4} + \omega'_{V5}) = 9.932 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S'_{\omega.V5} := t \cdot \frac{s_5}{2} \cdot (\omega'_{V5} + \omega'_{V6}) = 7.499 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S'_{\omega.V6} := t \cdot \frac{s_6}{2} \cdot (\omega'_{V6} + \omega'_{V7}) = 8.549 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S'_{\omega.V7} := t \cdot \frac{s_7}{2} \cdot (\omega'_{V7} + \omega'_{V8}) = 1.703 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

$$S'_{\omega.V} := S'_{\omega.V1} + S'_{\omega.V2} + S'_{\omega.V3} + S'_{\omega.V4} + S'_{\omega.V5} + S'_{\omega.V6} + S'_{\omega.V7} = 7.208 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$$

Normeeraus:

$$A_p = 1589.4 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega_{V1} := \omega'_{V1} - \frac{S'_{\omega.V}}{A_p} = -4534.977 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega_{V2} := \omega'_{V2} - \frac{S'_{\omega.V}}{A_p} = -171.473 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega_{V3} := \omega'_{V3} - \frac{S'_{\omega.V}}{A_p} = 1434.527 \cdot \text{mm}^2$$

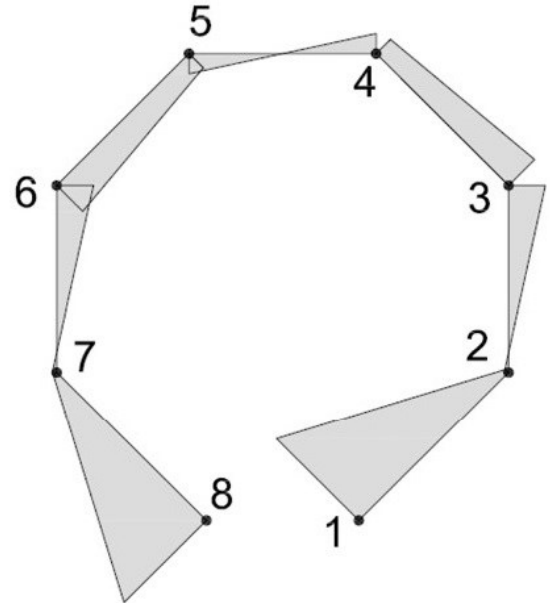
$$\omega_{V4} := \omega'_{V4} - \frac{S'_{\omega.V}}{A_p} = 786.823 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega_{V5} := \omega'_{V5} - \frac{S'_{\omega.V}}{A_p} = -786.823 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega_{V6} := \omega'_{V6} - \frac{S'_{\omega.V}}{A_p} = -1434.527 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega_{V7} := \omega'_{V7} - \frac{S'_{\omega.V}}{A_p} = 171.473 \cdot \text{mm}^2$$

$$\omega_{V8} := \omega'_{V8} - \frac{S'_{\omega.V}}{A_p} = 4534.977 \cdot \text{mm}^2$$

**Sektoriaalinen jäyhyysmomentti:**

$$I_{\omega} = I_{\omega.V}$$

$$I_{\omega.V1} := t \cdot \frac{s_1}{3} \cdot (\omega_{V1}^2 + \omega_{V1} \cdot \omega_{V2} + \omega_{V2}^2) = 1.761 \times 10^9 \cdot \text{mm}^6$$

$$I_{\omega.V2} := t \cdot \frac{s_2}{3} \cdot (\omega_{V2}^2 + \omega_{V2} \cdot \omega_{V3} + \omega_{V3}^2) = 1.344 \times 10^8 \cdot \text{mm}^6$$

$$I_{\omega.V3} := t \cdot \frac{s_3}{3} \cdot (\omega_{V3}^2 + \omega_{V3} \cdot \omega_{V4} + \omega_{V4}^2) = 2.778 \times 10^8 \cdot \text{mm}^6$$

$$I_{\omega.V4} := t \cdot \frac{s_4}{3} \cdot (\omega_{V4}^2 + \omega_{V4} \cdot \omega_{V5} + \omega_{V5}^2) = 4.519 \times 10^7 \cdot \text{mm}^6$$

$$I_{\omega.V5} := t \cdot \frac{s_5}{3} \cdot (\omega_{V5}^2 + \omega_{V5} \cdot \omega_{V6} + \omega_{V6}^2) = 2.778 \times 10^8 \cdot \text{mm}^6$$

$$I_{\omega.V6} := t \cdot \frac{s_6}{3} \cdot (\omega_{V6}^2 + \omega_{V6} \cdot \omega_{V7} + \omega_{V7}^2) = 1.344 \times 10^8 \cdot \text{mm}^6$$

$$I_{\omega.V7} := t \cdot \frac{s_7}{3} \cdot (\omega_{V7}^2 + \omega_{V7} \cdot \omega_{V8} + \omega_{V8}^2) = 1.761 \times 10^9 \cdot \text{mm}^6$$

$$I_{\omega} := I_{\omega.V1} + I_{\omega.V2} + I_{\omega.V3} + I_{\omega.V4} + I_{\omega.V5} + I_{\omega.V6} + I_{\omega.V7} = 4.392 \times 10^9 \cdot \text{mm}^6$$

Vääntöjähyysmomentti:

$$I_t := \frac{1}{3} \cdot t^3 \cdot (s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + s_5 + s_6 + s_7) = 19072.8 \cdot \text{mm}^4$$

Osapinnan staattiset momentit ja sektoriaalinen staattinen momentti:

Laskentapisteet:

$y_{s1} := y_1$	$z_{s1} := z_1$	$\omega_{sV1} := \omega_{V1} = -4534.977 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s2} := 0.5(y_1 + y_2)$	$z_{s2} := 0.5(z_1 + z_2)$	$\omega_{sV2} := 0.5(\omega_{V1} + \omega_{V2}) = -2353.225 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s3} := y_2$	$z_{s3} := z_2$	$\omega_{sV3} := \omega_{V2} = -171.473 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s4} := 0.5(y_2 + y_3)$	$z_{s4} := 0.5(z_2 + z_3)$	$\omega_{sV4} := 0.5(\omega_{V2} + \omega_{V3}) = 631.527 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s5} := y_3$	$z_{s5} := z_3$	$\omega_{sV5} := \omega_{V3} = 1434.527 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s6} := 0.5(y_3 + y_4)$	$z_{s6} := 0.5(z_3 + z_4)$	$\omega_{sV6} := 0.5(\omega_{V3} + \omega_{V4}) = 1110.675 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s7} := y_4$	$z_{s7} := z_4$	$\omega_{sV7} := \omega_{V4} = 786.823 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s8} := 0.5(y_4 + y_5)$	$z_{s8} := 0.5(z_4 + z_5)$	$\omega_{sV8} := 0.5(\omega_{V4} + \omega_{V5}) = 6.505 \times 10^{-13} \cdot \text{mm}^2$
$y_{s9} := y_5$	$z_{s9} := z_5$	$\omega_{sV9} := \omega_{V5} = -786.823 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s10} := 0.5(y_5 + y_6)$	$z_{s10} := 0.5(z_5 + z_6)$	$\omega_{sV10} := 0.5(\omega_{V5} + \omega_{V6}) = -1110.675 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s11} := y_6$	$z_{s11} := z_6$	$\omega_{sV11} := \omega_{V6} = -1434.527 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s12} := 0.5(y_6 + y_7)$	$z_{s12} := 0.5(z_6 + z_7)$	$\omega_{sV12} := 0.5(\omega_{V6} + \omega_{V7}) = -631.527 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s13} := y_7$	$z_{s13} := z_7$	$\omega_{sV13} := \omega_{V7} = 171.473 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s14} := 0.5(y_7 + y_8)$	$z_{s14} := 0.5(z_7 + z_8)$	$\omega_{sV14} := 0.5(\omega_{V7} + \omega_{V8}) = 2353.225 \cdot \text{mm}^2$
$y_{s15} := y_8$	$z_{s15} := z_8$	$\omega_{sV15} := \omega_{V8} = 4534.977 \cdot \text{mm}^2$

$$\text{Pisteessä 1 } S_{y1} = S_{z1} = S_{\omega V1} = 0.$$

$$S_{y1} := 0$$

$$S_{y2} := S_{y1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_1}{2} \cdot t \cdot (z_{s1} + z_{s2}) = -2731.56 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y3} := S_{y2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_1}{2} \cdot t \cdot (z_{s2} + z_{s3}) = -7267.68 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y4} := S_{y3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_2}{2} \cdot t \cdot (z_{s3} + z_{s4}) = -12085.68 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y5} := S_{y4} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_2}{2} \cdot t \cdot (z_{s4} + z_{s5}) = -16903.68 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y6} := S_{y5} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_3}{2} \cdot t \cdot (z_{s5} + z_{s6}) = -21015.405 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y7} := S_{y6} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_3}{2} \cdot t \cdot (z_{s6} + z_{s7}) = -23714.58 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y8} := S_{y7} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_4}{2} \cdot t \cdot (z_{s7} + z_{s8}) = -24711.03 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y9} := S_{y8} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_4}{2} \cdot t \cdot (z_{s8} + z_{s9}) = -23714.58 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y10} := S_{y9} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_5}{2} \cdot t \cdot (z_{s9} + z_{s10}) = -21015.405 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y11} := S_{y10} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_5}{2} \cdot t \cdot (z_{s10} + z_{s11}) = -16903.68 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y12} := S_{y11} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_6}{2} \cdot t \cdot (z_{s11} + z_{s12}) = -12085.68 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y13} := S_{y12} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_6}{2} \cdot t \cdot (z_{s12} + z_{s13}) = -7267.68 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y14} := S_{y13} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_7}{2} \cdot t \cdot (z_{s13} + z_{s14}) = -2731.56 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{y15} := 0$$

$S_y := S_{y1} + S_{y2} + S_{y3} + S_{y4} + S_{y5} + S_{y6} + S_{y7} + S_{y8} \dots$ $+ S_{y9} + S_{y10} + S_{y11} + S_{y12} + S_{y13} + S_{y14} + S_{y15}$	$= -1.921 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$
---	--

$$S_{z1} := 0$$

$$S_{z2} := S_{z1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_1}{2} \cdot t \cdot (y_{s1} + y_{s2}) = -5503.942 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z3} := S_{z2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_1}{2} \cdot t \cdot (y_{s2} + y_{s3}) = -9203.324 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z4} := S_{z3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_2}{2} \cdot t \cdot (y_{s3} + y_{s4}) = -10684.889 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z5} := S_{z4} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_2}{2} \cdot t \cdot (y_{s4} + y_{s5}) = -10173.554 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z6} := S_{z5} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_3}{2} \cdot t \cdot (y_{s5} + y_{s6}) = -7959.495 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z7} := S_{z6} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_3}{2} \cdot t \cdot (y_{s6} + y_{s7}) = -4332.885 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z8} := S_{z7} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_4}{2} \cdot t \cdot (y_{s7} + y_{s8}) = 0 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z9} := S_{z8} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_4}{2} \cdot t \cdot (y_{s8} + y_{s9}) = 4332.885 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z10} := S_{z9} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_5}{2} \cdot t \cdot (y_{s9} + y_{s10}) = 7959.495 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z11} := S_{z10} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_5}{2} \cdot t \cdot (y_{s10} + y_{s11}) = 10173.554 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z12} := S_{z11} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_6}{2} \cdot t \cdot (y_{s11} + y_{s12}) = 10684.889 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z13} := S_{z12} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_6}{2} \cdot t \cdot (y_{s12} + y_{s13}) = 9203.324 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z14} := S_{z13} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_7}{2} \cdot t \cdot (y_{s13} + y_{s14}) = 5503.942 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z15} := 0$$

$S_z := S_{z1} + S_{z2} + S_{z3} + S_{z4} + S_{z5} + S_{z6} + S_{z7} + S_{z8} \dots = 0 \cdot \text{mm}^3$ $+ S_{z9} + S_{z10} + S_{z11} + S_{z12} + S_{z13} + S_{z14} + S_{z15}$

$$S_{\omega 1} := 0$$

$$S_{\omega 2} := S_{\omega 1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_1}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV1} + \omega_{sV2}) = 4.257 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 3} := S_{\omega 2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_1}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV2} + \omega_{sV3}) = 5.817 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 4} := S_{\omega 3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_2}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV3} + \omega_{sV4}) = 5.565 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 5} := S_{\omega 4} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_2}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV4} + \omega_{sV5}) = 4.434 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 6} := S_{\omega 5} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_3}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV5} + \omega_{sV6}) = 3.041 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 7} := S_{\omega 6} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_3}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV6} + \omega_{sV7}) = 2.002 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 8} := S_{\omega 7} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_4}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV7} + \omega_{sV8}) = 1.571 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 9} := S_{\omega 8} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_4}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV8} + \omega_{sV9}) = 2.002 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 10} := S_{\omega 9} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_5}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV9} + \omega_{sV10}) = 3.041 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 11} := S_{\omega 10} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_5}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV10} + \omega_{sV11}) = 4.434 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 12} := S_{\omega 11} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_6}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV11} + \omega_{sV12}) = 5.565 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 13} := S_{\omega 12} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_6}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV12} + \omega_{sV13}) = 5.817 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 14} := S_{\omega 13} - \frac{1}{2} \cdot \frac{s_7}{2} \cdot t \cdot (\omega_{sV13} + \omega_{sV14}) = 4.257 \times 10^5 \cdot \text{mm}^4$$

$$S_{\omega 15} := 0$$

$S_{\omega} := S_{\omega 1} + S_{\omega 2} + S_{\omega 3} + S_{\omega 4} + S_{\omega 5} + S_{\omega 6} + S_{\omega 7} + S_{\omega 8} + S_{\omega 9} \dots = 5.18 \times 10^6 \cdot \text{mm}^4$ $+ S_{\omega 10} + S_{\omega 11} + S_{\omega 12} + S_{\omega 13} + S_{\omega 14} + S_{\omega 15}$

Liite 4. C-paalun teräslevyjen ja hitsausaineen ainestodistukset

C-paalujen valmistuksessa käytetyn teräslevyn ainestodistus (E063315) – Materiaali 1

JSW STEEL LTD.,

Works: P.O. VIDYANAGAR Dist: Bellary State: Karnataka INDIA

MILL TEST CERTIFICATE (According to EN 10204 - 3.1)

TO:
STEMCOR AC
GRAFENAUWEC 4
6300 ZUG
SWITZERLAND

TIC No.: Stemcor /BAP12-1301
Product: Hot Rolled Steel Coils

Date: 25.09.2012
Order No.: INJWSWHS/2012-130216 Dated: 18.08.2012
Specification: EN 10149 S355 MC

Specifications requirements:

(Reference: As per TDS no. INJWSWHS/2012-130216 Dated 18.08.2012 and EN 10149 S355 MC)

Min →

Max →

Weight(kg)

Normal Size (mm)

T X W X L

8 X 1500 X COIL 27.41

8 X 1500 X COIL 27.18

8 X 1500 X COIL 27.18

8 X 1500 X COIL 28.45

8 X 1500 X COIL 28.45

8 X 1500 X COIL 28.77

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

8 X 1500 X COIL 27.11

C	Mn	S	P	Si	Al	Cr	Ni	Mo	Ne	V	Ti	Sn	Cu	Cb	B	N	C.E	YS	UTS	EL	YSUTS	Impact @ TT, 100°
0.12	1.30	0.020	0.003	0.030	-	-	-	0.006	-	0.030	0.150	-	-	-	-	-	-	-	550	-	-	-

C	Mn	S	P	Si	Al	Cr	Ni	Mo	Ne	V	Ti	Sn	Cu	Cb	B	N	C.E	YS	UTS	EL	YSUTS	Impact @ TT, 100°
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	
0.097	1.010	0.006	0.008	0.028	0.031	0.016	0.013	0.005	0.001	0.001	0.015	0.001	0.007	0.001	0.0002	0.0038	451	25	0.857	141	PASS	

C-paalujen valmistuksessa käytetyn teräslevyn aineodistus – Materiaali 2



Sida 1 (1)

SSAB EMEA AB, SE-781 84 BORLÄNGE, Sweden

Kontrollintyö 3.1 EN 10 204 - 3.1		A02	Uhfärdande avdelning Kvalitetsavdelningen	A05	Köparens ordernr 23313	A07	Vårt ordernr 750304-2	A08	Fakturanr 2403784	A19	Intyg och datum 14257792 2013-04-10	A03
Köpare Stenkor Finland Oy Annankatu 29 A 13 FI-00100 HELSINKI FINLAND		A11 23673		Produkt Varmv betad bandpl rullar		B01		Märkning Tillverkare, MATERIALID		B06		B02
Antal 1		B03 Dimensioner [mm] T 6 B 1500 L 0		B09-B11 Vikt [kg] 13120		B12 MATERIALID 28-0568-43-449699B		B07		B04 Lev. tillst.		B16
Intygmottagare Stenkor Finland Oy Annankatu 29 A 13 FI-00100 HELSINKI FINLAND		A06		Kundens märke		B15						
Kemisk sammansättning												
Charge 28-0568-43												
C Si Mn P S Cr Ni Mo V Ti Cu Al Nb B N Ceqv .068 .01 .57 .008 .003 .04 .00 .00 .00 .01 .038 .038 .0001 .003 .17												
C71-C92 Carbon equivalent etc Ceqv = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5												
C93-C99												
Provtyp												
C04												
Verkskod												
C20												
Provatav position												
C01												
Riktning												
C02												
Behandling												
B05												
Provstat typ												
C10												
Temp [gr C]												
C03												
Provresultat												
C11												
Reh [MPa]												
C12												
Rm [MPa]												
C13												
A5 [%]												
25,5												
C42												
E [J]												
C43												
Mv [J]												
114												
C50												
Uttford med go												
diktat resultat												
Produktionstid: 2013-04-09-16.42.00.000000												

Härmed intygas att ovannämnt material uppfyller orderns fordringar.		Z02	Intyget är framställt elektroniskt och giltigt utan signering		Z01	A22		A04
			Material Testing / L. Smeth / M. Eräs / L. Söderqvist					

C-paalujen valmistuksessa käytetyn hitsausaineen aineodistus

LINCOLN
ELECTRIC
 THE WELDING EXPERTS®

Test Report

Product	UltraMag, Sandvik 15kg PLW		
Size(s) mm	1,00		
Item No.	E10V015P6X00	Quantity	15,0
Lot/batch	C1 20271		
Product Line	MIG Wire		
Classification	AWS A5.18 ER70S-6 ISO 14341-A-G3Si1 GOST 2246-70: Sv08GS		

Chemical analysis (%)										According to EN10204:2004			2.2
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	Zr+Ti max		
0,07	0,88	1,44	0,010	0,005	0,060	0,040	0,004	0,070	0,003	0,005	0,10		

Mechanical tests, all weld metal							According to EN10204:2004		2.2
Tensile testing						Impact testing			
Class	Yield N/mm ²	Tensile N/mm ²	Elongation %			Temp. °C	Avg. J	Shielding gas	
AWS	451	556	31			-30	65	CO ₂	
EN/DIN	471	580	25			-40	73	Ar/CO ₂	

Additional information	According to EN10204:2004
Other tests	

Remarks

This certificate is generated electronically, and is valid without signature

The product identified above has been manufactured, tested and supplied in compliance with a certified ISO 9001 Quality Assurance Programme.
It should be noted that the mechanical properties of all weld metal specimens could vary from those obtained in production joints because of differences in welding procedures.

Company	Printed by	Function	Date	Cert. No.
Lincoln Smitweld B.V.	. Mylincoln.	Mylincoln	17/10/2013	Mylincoln
Registered office:	Telephone:	Fax:		
P.O. Box 263, 6600 AG	+31 24 3522911	+31 24 3522200		
Nieuwe Dukenburgseweg 20				
6634 AD NIJMEGEN				
NETHERLANDS				

Certificate V10.0

Liite 5. Lyhyen C-paulun puristuskokeiden koekappaleiden mitatiedot

KOKEUORMITUS:		Puristuskoe, paalun varsiosa		
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		P1		
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.10.2013		
MITTATIEDOT				
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³		
Massa m =	2380,4	g		
Poikkipinta-ala A =	1510,4	mm ²		
PITUUS L =		200,9		mm
1. 200,8		4. 200,6	7. 201,3	
2. 200,7		5. 201,1		
3. 200,5		6. 201,4		
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta				
HALKAISIJA D =				
	x=0	x=L	ka	
D1	93,6	93,8	93,7	mm
D2	91,8	91,9	91,9	mm
D3	90,7	90,9	90,8	mm
D4	92,1	92,0	92,1	mm
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti				
SUORUUSPOIKKEAMA				
Suorustuspoikkeama $\Delta 1$			-	mm
Suorustuspoikkeama $\Delta 2$			-	mm
Suorustuspoikkeama $\Delta 3$			-	mm
Suorustuspoikkeama $\Delta 4$			-	mm
SEINÄMÄN PAKSUUS t =		6,0		mm
	x=0	x=L	ka	
t1	5,9	6,0	5,95	
t2	5,9	6,0	5,95	
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä				
HAHLON LEVEYS		24,9		
	x=0	x=L/2	x=L	
	24,8	25,0	25,0	
KATKOHITSIN MITTATIEDOT				
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =		50		mm
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =		25		mm
37	19	50	25	65
5 mm				

KOEUORMITUS:		Puristuskoe, paalun varsiosa			
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		P2			
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.10.2013			
MITTATIEDOT					
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³			
Massa m =	2358,4	g			
Poikkipinta-ala A =	1507,2	mm ²			
PITUUS L =		199,5		mm	
1.	200,0	4.	198,7	7.	200,1
2.	199,6	5.	199,0		
3.	199,1	6.	199,8		
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta					
HALKAISIJA D =					
	$x=0$	$x=L$	k_a		
D1	93,5	93,6	93,6	mm	
D2	91,9	92,0	92,0	mm	
D3	91,0	90,7	90,9	mm	
D4	92,0	91,9	92,0	mm	
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti					
SUORUUSPOIKKEAMA					
Suoruispoikkeama $\Delta 1$	0			mm	
Suoruispoikkeama $\Delta 2$	0			mm	
Suoruispoikkeama $\Delta 3$	0			mm	
Suoruispoikkeama $\Delta 4$	0			mm	
SEINÄMÄN PAKSUUS t =		6,0 mm			
	$x=0$	$x=L$	k_a		
t1	5,9	6,1	6,0		
t2	5,9	6,0	6,0		
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä					
HAHLON LEVEYS		25,0			
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$		
t1	25,1	25,0	24,9		
KATKOHITSIN MITTATIEDOT					
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =		56 mm			
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =		29 mm			
25	63	29	56	27	
mm					

KOEKUORMITUS:		Puristuskoe, paalun varsiosa					
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		P3					
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.10.2013					
MITTATIEDOT							
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³					
Massa m =	2379,5	g					
Poikkipinta-ala A =	1511,6	mm ²					
PITUUS L =				200,7	mm		
1.		200,5	4.	200,8	7.	200,8	
2.		200,4	5.	200,9			
3.		200,6	6.	200,7			
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta							
HALKAISIJA D =							
	$x=0$	$x=L$	k_a				
D1	93,7	93,0	93,4	mm			
D2	92,3	92,6	92,5	mm			
D3	91,6	91,4	91,5	mm			
D4	92,2	92,2	92,2	mm			
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti							
SUORUUSPOIKKEAMA							
Suoruispoikkeama $\Delta 1$				0	mm		
Suoruispoikkeama $\Delta 2$				0	mm		
Suoruispoikkeama $\Delta 3$				0	mm		
Suoruispoikkeama $\Delta 4$				0	mm		
SEINÄMÄN PAKSUUS t =				6,0	mm		
	$x=0$	$x=L$	k_a				
t1	6,0	6,0	6,0				
t2	6,0	6,0	6,0				
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä							
HAHLON LEVEYS				25,9			
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$				
	25,9	25,8	25,9				
KATKOHITSIN MITTATIEDOT							
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =				20	mm		
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =				23	mm		
52	23	36	15	20	20	34	mm

KOKEUORMITUS:		Puristuskoe, paalun kärki																				
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		Pa1																				
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.10.2013																				
MITTATIEDOT																						
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³																				
Massa m =	2455,4	g	Massaan lisätty reikien ja viisteiden painot																			
Poikkipinta-alat																						
A_varsi =	1561,0	mm ²																				
A_reikä =	1381,0	mm ²																				
A_kärki =	1440,97	mm ²																				
PITUUS L =																						
		200,5	mm																			
<table border="1"> <tr> <td>1.</td> <td>200,5</td> <td>4.</td> <td>200,4</td> <td>7.</td> <td>200,6</td> </tr> <tr> <td>2.</td> <td>200,3</td> <td>5.</td> <td>200,8</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3.</td> <td>200,4</td> <td>6.</td> <td>200,7</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					1.	200,5	4.	200,4	7.	200,6	2.	200,3	5.	200,8			3.	200,4	6.	200,7		
1.	200,5	4.	200,4	7.	200,6																	
2.	200,3	5.	200,8																			
3.	200,4	6.	200,7																			
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta																						
HALKAISIJA D =																						
	x=0	x=L	ka																			
D1	93,5	93,8	93,7	mm																		
D2	94,3	93,3	93,8	mm																		
D3	93,6	92,3	93,0	mm																		
D4	92,8	92,3	92,6	mm																		
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti																						
SUORUUSPOIKKEAMA																						
Suoruspöikeama $\Delta 1$		0		mm																		
Suoruspöikeama $\Delta 2$		0		mm																		
Suoruspöikeama $\Delta 3$		0		mm																		
Suoruspöikeama $\Delta 4$		0		mm																		
SEINÄMÄN PAKSUUS t =																						
		6,1		mm																		
	x=0	x=L	ka																			
t1	6,1	6,0	6,1																			
t2	6,0	6,1	6,1																			
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä																						
HAHLON LEVEYS																						
		26,8																				
	x=0	x=L/2	x=L																			
	27,6	26,8	26,0																			
KATKOHITSIN MITTATIEDOT																						
Katkohitsin minimipituus, l_w.min =		54		mm																		
Katkohitsin maksimiväli, e_w.max =		40		mm																		
<table border="1"> <tr> <td>62</td> <td>40</td> <td>54</td> <td>14</td> <td>20</td> <td>mm</td> </tr> </table>					62	40	54	14	20	mm												
62	40	54	14	20	mm																	

KOKEUORMITUS:		Puristuskoe, paalun kärki																				
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		Pa2																				
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.10.2013																				
MITTATIEDOT																						
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³																				
Massa m =	2423,2	g	Massaan lisätty reikien ja viisteiden painot																			
Poikkipinta-alat																						
A_varsi =	1543,7	mm ²																				
A_reikä =	1363,7	mm ²																				
A_kärki =	1423,7	mm ²																				
PITUUS L =																						
			200,1	mm																		
<table border="1"> <tr> <td>1.</td> <td>199,8</td> <td>4.</td> <td>199,9</td> <td>7.</td> <td>200,5</td> </tr> <tr> <td>2.</td> <td>199,8</td> <td>5.</td> <td>200,5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3.</td> <td>199,9</td> <td>6.</td> <td>200,4</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					1.	199,8	4.	199,9	7.	200,5	2.	199,8	5.	200,5			3.	199,9	6.	200,4		
1.	199,8	4.	199,9	7.	200,5																	
2.	199,8	5.	200,5																			
3.	199,9	6.	200,4																			
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta																						
HALKAISIJA D =																						
	x=0	x=L	ka																			
D1	93,0	93,5	93,3	mm																		
D2	93,5	92,6	93,1	mm																		
D3	92,6	91,5	92,1	mm																		
D4	92,8	92,4	92,6	mm																		
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti																						
SUORUUSPOIKKEAMA																						
<table border="1"> <tr> <td>Suoruispoikkeama $\Delta 1$</td> <td>0</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>Suoruispoikkeama $\Delta 2$</td> <td>0</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>Suoruispoikkeama $\Delta 3$</td> <td>0</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>Suoruispoikkeama $\Delta 4$</td> <td>0</td> <td>mm</td> </tr> </table>					Suoruispoikkeama $\Delta 1$	0	mm	Suoruispoikkeama $\Delta 2$	0	mm	Suoruispoikkeama $\Delta 3$	0	mm	Suoruispoikkeama $\Delta 4$	0	mm						
Suoruispoikkeama $\Delta 1$	0	mm																				
Suoruispoikkeama $\Delta 2$	0	mm																				
Suoruispoikkeama $\Delta 3$	0	mm																				
Suoruispoikkeama $\Delta 4$	0	mm																				
SEINÄMÄN PAKSUUS t =																						
			6,1	mm																		
	x=0	x=L	ka																			
t1	6,1	6,1	6,1																			
t2	6,1	6,1	6,1																			
Kappaleen molempien teräslevyjien paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä																						
HAHLON LEVEYS																						
			26,0																			
	x=0	x=L/2	x=L																			
	27,0	25,8	25,3																			
KATKOHITSIN MITTATIEDOT																						
Katkohitsin minimipituus, l_w.min =			-	mm																		
Katkohitsin maksimiväli, e_w.max =			60	mm																		
			77	60																		
			63	mm																		

KOKEUORMITUS:		Puristuskoe, paalun kärki																				
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		Pa3																				
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.10.2013																				
MITTATIEDOT																						
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³																				
Massa m =	2408,5	g	Massaan lisätty reikien ja viisteiden painot																			
Poikkipinta-alat																						
A_varsi =	1538,2	mm ²																				
A_reikä =	1358,2	mm ²																				
A_kärki =	1418,2	mm ²																				
PITUUS L =		199,6		mm																		
<table border="1"> <tr> <td>1.</td> <td>199,3</td> <td>4.</td> <td>199,4</td> <td>7.</td> <td>200,0</td> </tr> <tr> <td>2.</td> <td>199,2</td> <td>5.</td> <td>200,0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3.</td> <td>199,3</td> <td>6.</td> <td>200,1</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					1.	199,3	4.	199,4	7.	200,0	2.	199,2	5.	200,0			3.	199,3	6.	200,1		
1.	199,3	4.	199,4	7.	200,0																	
2.	199,2	5.	200,0																			
3.	199,3	6.	200,1																			
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta																						
HALKAISIJA D =																						
	x=0	x=L	ka																			
D1	93,0	93,8	93,4	mm																		
D2	93,6	92,4	93,0	mm																		
D3	93,0	92,0	92,5	mm																		
D4	93,5	92,0	92,8	mm																		
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti																						
SUORUUSPOIKKEAMA																						
Suoruispoikkeama $\Delta 1$			0	mm																		
Suoruispoikkeama $\Delta 2$			0	mm																		
Suoruispoikkeama $\Delta 3$			0	mm																		
Suoruispoikkeama $\Delta 4$			0	mm																		
SEINÄMÄN PAKSUUS t =		6,1		mm																		
	x=0	x=L	ka																			
t1	6,1	6,2	6,2																			
t2	6,1	6,1	6,1																			
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä																						
HAHLON LEVEYS		25,7																				
	x=0	x=L/2	x=L																			
	26,3	25,9	24,9																			
KATKOHITSIN MITTATIEDOT																						
Katkohitsin minimipituus, l_w.min =		80		mm																		
Katkohitsin maksimiväli, e_w.max =		31		mm																		
		73	31	80																		
				16																		
		mm																				

Liite 6. Taivutuskokeiden koekappaleiden mittatiedot

KOEUORMITUS:		Taivutuskoe, ei-jatkettu		
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		T1		
PÄIVÄMÄÄRÄ:		13.11.2013		
MITTATIEDOT				
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³		
Massa m =	52 100	g		
Poikkipinta-ala A =	1510,0	mm ²		
PITUUS L =		4399		mm
	1.	4399	4.	4398
	2.	4398	5.	4398
	3.	4398	6.	4399
	7.	4400		
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta				
HALKAISIJA D =				
		$x=0$	$x=L$	k_a
	D1	95,0	93,7	94,4 mm
	D2	91,5	92,4	92,0 mm
	D3	91,8	92,1	92,0 mm
	D4	94,5	92,0	93,3 mm
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti				
SUORUUSPOIKKEAMA				
Suorustuspoikkeama $\Delta 1$	-5,5	mm	Δ/L	-0,0013
Suorustuspoikkeama $\Delta 2$	-3,5	mm		-0,0008
SEINÄMÄN PAKSUUS t =		6,0		mm
	$x=0$	$x=L$	k_a	
t1	6,0	5,9	6,0	
t2	6,0	6,0	6,0	
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä				
HAHLON LEVEYS		25,2		mm
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$	
	25,2	24,5	26,0	
KATKOHITSIN MITTATIEDOT				
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =	30		mm	
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =	80		mm	

KOEUORMITUS:		Taivutuskoe, ei-jatkettu			
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		T2			
PÄIVÄMÄÄRÄ:		14.11.2013			
MITTATIEDOT					
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³			
Massa m =	51 900	g			
Poikkipinta-ala A =	1504,0	mm ²			
PITUUS L =			4399	mm	
1.	4400	4.	4399	7.	4399,0
2.	4399	5.	4398		
3.	4399	6.	4399		
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta					
HALKAISIJA D =					
	$x=0$	$x=L$	k_a		
D1	94,2	95,2	94,7	mm	
D2	91,2	92,4	91,8	mm	
D3	90,1	92,3	91,2	mm	
D4	93,0	91,7	92,4	mm	
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti					
SUORUUSPOIKKEAMA					
Suoruuksipointeama $\Delta 1$	-5,0	mm	L/Δ	-0,0011	
Suoruuksipointeama $\Delta 2$	-3,0	mm		-0,0007	
SEINÄMÄN PAKSUUS t =			6,0	mm	
	$x=0$	$x=L$	k_a		
t1	5,9	6,1	6,0		
t2	6,0	6,1	6,1		
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä					
HAHLON LEVEYS			24,9	mm	
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$		
	25,0	24,4	25,2		
KATKOHITSIN MITTATIEDOT					
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =			40	mm	
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =			70	mm	

KOEKUORMITUS:		Taivutuskoe, ei-jatkettu			
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		T3			
PÄIVÄMÄÄRÄ:		14.11.2013			
MITTATIEDOT					
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³			
Massa m =	51 950	g			
Poikkipinta-ala A =	1505,1	mm ²			
PITUUS L =			4400	mm	
1.	4400	4.	4400	7.	4400
2.	4400	5.	4400		
3.	4400	6.	4400		
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta					
HALKAISIJA D =					
	$x=0$	$x=L$	k_a		
D1	94,7	93,9	94,3	mm	
D2	91,1	91,4	91,3	mm	
D3	91,3	90,8	91,1	mm	
D4	91,8	92,3	92,1	mm	
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti					
SUORUUSPOIKKEAMA					
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$	-5,0	mm	L/Δ	-0,0011	
SuoruuSpoikkeama $\Delta 3$	-3,5	mm		-0,0008	
SEINÄMÄN PAKSUUS t =			6,0	mm	
	$x=0$	$x=L$	k_a		
t1	5,9	5,9	5,9		
t2	6,0	6,0	6,0		
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä					
HAHLON LEVEYS			24,7	mm	
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$		
	24,6	24,2	25,2		
KATKOHITSIN MITTATIEDOT					
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =			40	mm	
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =			66	mm	

KOEKUORMITUS:		Taivutuskoe, jatkettu			
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		TJ1			
PÄIVÄMÄÄRÄ:		14.11.2013			
MITTATIEDOT					
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =		
Massa m =	58 600	g	6970	g	
Poikkipinta-ala A =	1495,6	mm ²	Varren osalla		
PITUUS L =		4401 mm			
1.	4402	4.	4400	7.	4401
2.	4401	5.	4400		
3.	4401	6.	4401		
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta					
HALKAISIJA D =					
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$	
D1	93,7	93,5	93,6 mm	104,1 mm	
D2	91,6	91,2	91,4 mm	106,1 mm	
D3	91,6	91,8	91,7 mm	105,6 mm	
D4	90,8	92,7	91,8 mm	105,8 mm	
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti					
SUORUUSPOIKKEAMA					
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$	-9,5	mm	L/Δ	-0,0022	
SuoruuSpoikkeama $\Delta 2$	0	mm		0,0000	
SEINÄMÄN PAKSUUS t =		6,0 mm			
	$x=0$	$x=L$	k_a		
t1	5,9	5,9	5,9		
t2	6,0	6,1	6,1		
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä					
HAHLON LEVEYS		25,1 mm			
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$		
	24,5	25,3	25,5		
KATKOHITSIN MITTATIEDOT					
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =		35 mm			
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =		75 mm			

KOEUORMITUS:		Taivutuskoe, jatkettu	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		TJ1	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		14.11.2013	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin		Tehdas-
Särmä	hitsi		hitsi
1.	22 mm	28	mm
2.	19 mm	28	mm
3.	21 mm	25	mm
4.	19 mm	25	mm
5.	23 mm	27	mm
6.	20 mm	28	mm
7.	19 mm	28	mm
SUMMA (I_w) =	143	189	
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
I _w .min =		- mm	
e _w .max =		- mm	
Tehdashitsi			
I _w .min =	35	mm	
e _w .max =	40	mm	



KOEKUORMITUS:		Taivutuskoe, jatkettu		
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		TJ2		
PÄIVÄMÄÄRÄ:		14.11.2013		
MITTATIEDOT				
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =	
Massa m =	58 650	g	6970	g
Poikkipinta-ala A =	1497,3	mm ²	Varren osalla	
PITUUS L =		4400 mm		
1.	4400	4.	4400	7.
2.	4400	5.	4400	
3.	4400	6.	4400	
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta				
HALKAISIJA D =				
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$
D1	93,2	94,9	94,1 mm	103,8 mm
D2	92,3	91,4	91,9 mm	107,4 mm
D3	91,8	91,7	91,8 mm	106,3 mm
D4	91,0	91,0	91,0 mm	107,5 mm
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti				
SUORUUSPOIKKEAMA				
Suoruukspoikkeama $\Delta 1$	-4,0	mm	L/Δ	-0,0009
Suoruukspoikkeama $\Delta 2$	0,0	mm		0,0000
SEINÄMÄN PAKSUUS t =		6,0 mm		
	$x=0$	$x=L$	k_a	
t1	6,0	6,0	6,0	
t2	5,9	6,0	6,0	
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä				
HAHLON LEVEYS		25,3 mm		
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$	
	25,2	25,2	25,6	
KATKOHITSIN MITTATIEDOT				
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =		35 mm		
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =		80 mm		

KOEUORMITUS:		Taivutuskoe, jatkettu	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		TJ2	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		14.11.2013	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin		Tehdas-
Särmä	hitsi		hitsi
1.	25 mm	40	mm
2.	20 mm	30	mm
3.	20 mm	35	mm
4.	20 mm	35	mm
5.	18 mm	35	mm
6.	18 mm	38	mm
7.	25 mm	37	mm
SUMMA (I_w) =	146	250	
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä sekä särmien 1. ja 7. nurkissa hitsi L-muodossa			
Tehdashitsi			
I_w.min =	35	mm	
e_w.max =	40	mm	



KOEKUORMITUS:		Taivutuskoe, jatkettu		
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		TJ3		
PÄIVÄMÄÄRÄ:		14.11.2013		
MITTATIEDOT				
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =	
Massa m =	58 650	g	6970	g
Poikkipinta-ala A =	1496,9	mm ²	Varren osalla	
PITUUS L =		4401 mm		
1.	4402	4.	4401	7.
2.	4401	5.	4401	
3.	4401	6.	4401	
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta				
HALKAISIJA D =				
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$
D1	94,3	93,9	94,1 mm	104,0 mm
D2	91,7	91,9	91,8 mm	106,4 mm
D3	90,8	91,7	91,3 mm	106,0 mm
D4	92,0	92,2	92,1 mm	106,4 mm
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti				
SUORUUSPOIKKEAMA				
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$	-2	mm	L/Δ	-0,0005
SuoruuSpoikkeama $\Delta 2$	-0,5	mm		-0,0001
SEINÄMÄN PAKSUUS t =		6,1 mm		
	$x=0$	$x=L$	k_a	
t1	6,1	5,9	6,0	
t2	6,1	6,1	6,1	
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä				
HAHLON LEVEYS		24,7 mm		
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$	
	24,8	24,5	24,9	
KATKOHITSIN MITTATIEDOT				
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =		40 mm		
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =		65 mm		

KOEKUORMITUS:		Taivutuskoe, jatkettu	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		TJ3	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		14.11.2013	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin		Tehdas-
Särmä	hitsi		hitsi
1.	30 mm	40	mm
2.	19 mm	30	mm
3.	19 mm	28	mm
4.	18 mm	45	mm
5.	17 mm	28	mm
6.	17 mm	28	mm
7.	30 mm	40	mm
SUMMA (I_w) =	150	239	
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä sekä keskellä			
Särmien 1. ja 7. nurkissa hitsi L-muodossa			
Tehdashitsi			
I_w.min =	35 mm		
e_w.max =	40 mm		

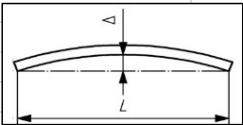


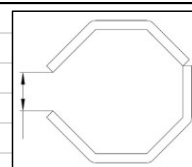
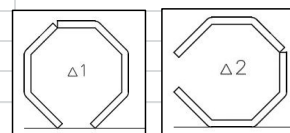
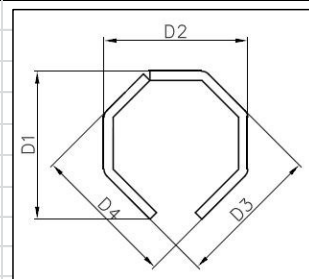
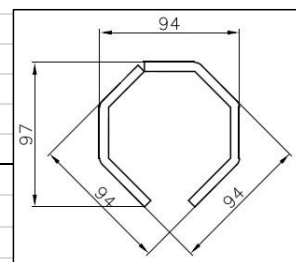
KOEKUORMITUS:		Taivutuskoe, jatkettu			
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		TJ4			
PÄIVÄMÄÄRÄ:		15.11.2013			
MITTATIEDOT					
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =		
Massa m =	58 750	g		6970 g	
Poikkipinta-ala A =	1499,1	mm ²	Varren osalla		
PITUUS L =			4403	mm	
1.	4404	4.	4403	7.	4404
2.	4403	5.	4403		
3.	4403	6.	4404		
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta					
HALKAISIJA D =					
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$	
D1	94,4	95,0	94,7 mm	103,9 mm	
D2	92,2	91,1	91,7 mm	107,4 mm	
D3	92,4	91,5	92,0 mm	106,1 mm	
D4	90,8	91,0	90,9 mm	106,0 mm	
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti					
SUORUUSPOIKKEAMA					
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$	-0,5	mm	L/Δ	-0,0001	
SuoruuSpoikkeama $\Delta 2$	-1,0	mm		-0,0002	
SEINÄMÄN PAKSUUS t =			6,0	mm	
	$x=0$	$x=L$	k_a		
t1	5,9	6,0	6,0		
t2	6,0	6,0	6,0		
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä					
HAHLON LEVEYS			25,1	mm	
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$		
	25,2	25,4	24,7		
KATKOHITSIN MITTATIEDOT					
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =				40 mm	
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =				60 mm	

KOEUORMITUS:		Taivutuskoe, jatkettu	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		TJ4	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		15.11.2013	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin		Tehdas-
Särmä	hitsi		hitsi
1.	22 mm	35	mm
2.	20 mm	30	mm
3.	20 mm	40	mm
4.	21 mm	35	mm
5.	20 mm	28	mm
6.	20 mm	30	mm
7.	21 mm	37	mm
SUMMA (I_w) =	144	235	
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä			
Tehdashitsi			
I_w.min =	35	mm	
e_w.max =	40	mm	



Liite 7. Nurjahduskokeiden koekappaleiden mittatiedot

KOEKUORMITUS:		Nurjahduskoe	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		N1	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		27.11.2013	
MITTATIEDOT			
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =
Massa m =	47 250	g	0 g
Poikkipinta-ala A =	1506,7	mm ²	Varren osalla
PITUUS L =		3998	mm
1.	3998	4.	3998
2.	3997	5.	3998
3.	3997	6.	3998
7. 3999			
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta			
HALKAISIJA D =			
	x=0	x=L	ka
D1	94,1	93,8	94,0 mm
D2	91,8	91,8	91,8 mm
D3	91,5	91,2	91,4 mm
D4	91,2	92,5	91,9 mm
		Jatkos x=L/2	
		-	mm
		-	mm
		-	mm
		-	mm
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti			
SUORUUSPOIKKEAMA			
			
Suoruspöikeama Δ1	-5,0	mm	L/Δ
Suoruspöikeama Δ2	-4,0	mm	-0,0013
			-0,0010
SEINÄMÄN PAKSUUS t =		6,0	mm
	x=0	x=L	ka
t1	5,9	6,0	6,0
t2	6,0	5,9	6,0
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä			
HAHLON LEVEYS		25,3	mm
	x=0	x=L/2	x=L
	24,8	25,2	25,9
KATKOHITSIN MITTATIEDOT			
Katkohitsin minimipituus, l_w.min =		40	mm
Katkohitsin maksimiväli, e_w.max =		65	mm




KOEKUORMITUS:		Nurjahduskoe		
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		N2		
PÄIVÄMÄÄRÄ:		28.11.2013		
MITTATIEDOT				
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =	
Massa m =	46 500	g		0 g
Poikkipinta-ala A =	1482,6	mm ²	Varren osalla	
PITUUS L =			3998 mm	
1.	3998	4.	3998	7.
2.	3998	5.	3999	
3.	3998	6.	3999	
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta				
HALKAISIJA D =				
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$
D1	93,0	92,4	92,7 mm	- mm
D2	91,0	90,2	90,6 mm	- mm
D3	91,6	89,4	90,5 mm	- mm
D4	90,5	92,0	91,3 mm	- mm
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti				
SUORUUSPOIKKEAMA				
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$	-6,0	mm	L/Δ	-0,0015
SuoruuSpoikkeama $\Delta 2$	-4,5	mm		-0,0011
SEINÄMÄN PAKSUUS t =			6,0 mm	
	$x=0$	$x=L$	k_a	
t1	5,9	6,0	6,0	
t2	6,0	6,0	6,0	
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä				
HAHLON LEVEYS			25,5 mm	
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$	
	25,7	25,1	25,6	
KATKOHITSIN MITTATIEDOT				
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =			40 mm	
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =			65 mm	

KOEKUORMITUS:		Nurjahduskoe			
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		N3			
PÄIVÄMÄÄRÄ:		26.11.2013			
MITTATIEDOT					
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =		
Massa m =	47 250	g		0 g	
Poikkipinta-ala A =	1506,0	mm ²	Varren osalla		
PITUUS L =			4000 mm		
1.	3999	4.	3999	7.	4000
2.	4000	5.	4000		
3.	3999	6.	4000		
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta					
HALKAISIJA D =					
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$	
D1	94,5	94,1	94,3 mm	- mm	
D2	92,0	91,9	92,0 mm	- mm	
D3	92,1	90,5	91,3 mm	- mm	
D4	91,0	92,4	91,7 mm	- mm	
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti					
SUORUUSPOIKKEAMA					
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$	-3,5	mm	L/Δ	-0,0009	
SuoruuSpoikkeama $\Delta 2$	-4,5	mm		-0,0011	
SEINÄMÄN PAKSUUS t =			6,0 mm		
	$x=0$	$x=L$	k_a		
t1	5,9	5,9	5,9		
t2	6,0	6,0	6,0		
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä					
HAHLON LEVEYS			25,3 mm		
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$		
	25,2	24,9	25,8		
KATKOHITSIN MITTATIEDOT					
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =			35 mm		
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =			70 mm		


KOEUORMITUS:		Nurjahduskoe		
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		NJ1		
PÄIVÄMÄÄRÄ:		27.11.2013		
MITTATIEDOT				
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =	
Massa m =	53 800	g	6913	g
Poikkipinta-ala A =	1494,2	mm ²	Varren osalla	
PITUUS L =			4000	mm
1.	4001	4.	4000	7.
2.	4001	5.	4000	
3.	4000	6.	4000	
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta				
HALKAISIJA D =				
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$
D1	93,9	95,1	94,5 mm	104,5 mm
D2	91,5	91,0	91,3 mm	106,1 mm
D3	91,8	91,0	91,4 mm	107,2 mm
D4	91,3	91,6	91,5 mm	105,8 mm
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti				
SUORUUSPOIKKEAMA				
Suoruukspoikkeama $\Delta 1$	0,0	mm	L/Δ	0,0000
Suoruukspoikkeama $\Delta 2$	-3,0	mm	-0,0007	
SEINÄMÄN PAKSUUS t =			6,0	mm
	$x=0$	$x=L$	k_a	
t1	6,1	6,0	6,1	
t2	6,0	5,9	6,0	
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä				
HAHLON LEVEYS			25,4	mm
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$	
	25,3	26,1	24,7	
KATKOHITSIN MITTATIEDOT				
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =			35	mm
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =			45	mm

KOEKUORMITUS:		Nurjahduskoe	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		NJ1	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		27.11.2013	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin	Tehdas-	
Särmä	hitsi	hitsi	
1.	24 mm	40 mm	
2.	24 mm	30 mm	
3.	23 mm	15 mm	
4.	23 mm	40 mm	
5.	24 mm	30 mm	
6.	24 mm	20 mm	
7.	21 mm	40 mm	
SUMMA (I_w) =	163	215	
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä			
Tehdashitsi			
I_w.min =	35 mm		
e_w.max =	45 mm		



KOEUORMITUS:		Nurjahduskoe																				
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		NJ2																				
PÄIVÄMÄÄRÄ:		27.11.2013																				
MITTATIEDOT																						
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =																			
Massa m =	53 700	g	6913	g																		
Poikkipinta-ala A =	1491,9	mm ²	Varren osalla																			
PITUUS L =			3998	mm																		
<table border="1"> <tr> <td>1.</td> <td>3998</td> <td>4.</td> <td>3998</td> <td>7.</td> <td>3997</td> </tr> <tr> <td>2.</td> <td>3999</td> <td>5.</td> <td>3998</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3.</td> <td>3998</td> <td>6.</td> <td>3998</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					1.	3998	4.	3998	7.	3997	2.	3999	5.	3998			3.	3998	6.	3998		
1.	3998	4.	3998	7.	3997																	
2.	3999	5.	3998																			
3.	3998	6.	3998																			
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta																						
HALKAISIJA D =																						
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$																		
D1	94,1	93,7	93,9 mm	104,2 mm																		
D2	91,2	90,8	91,0 mm	105,6 mm																		
D3	90,9	91,7	91,3 mm	104,7 mm																		
D4	91,9	90,8	91,4 mm	105,9 mm																		
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti																						
SUORUUSPOIKKEAMA																						
Suoruukspoikkeama $\Delta 1$	-4,5	mm	L/Δ	-0,0011																		
Suoruukspoikkeama $\Delta 2$	-4,5	mm		-0,0011																		
SEINÄMÄN PAKSUUS t =			6,0	mm																		
	$x=0$	$x=L$	k_a																			
t1	6,0	5,9	6,0																			
t2	6,1	5,9	6,0																			
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä																						
HAHLON LEVEYS			24,9	mm																		
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$																			
	24,3	25,1	25,2																			
KATKOHITSIN MITTATIEDOT																						
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =			40	mm																		
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =			70	mm																		

KOEKUORMITUS:		Nurjahduskoe	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		NJ2	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		27.11.2013	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin		Tehdas-
Särmä	hitsi		hitsi
1.	23 mm	40	mm
2.	30 mm	25	mm
3.	22 mm	35	mm
4.	22 mm	30	mm
5.	25 mm	25	mm
6.	30 mm	30	mm
7.	25 mm	35	mm
SUMMA (I_w) =	177	220	
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä			
Tehdashitsi			
I_w.min =	25	mm	
e_w.max =	55	mm	

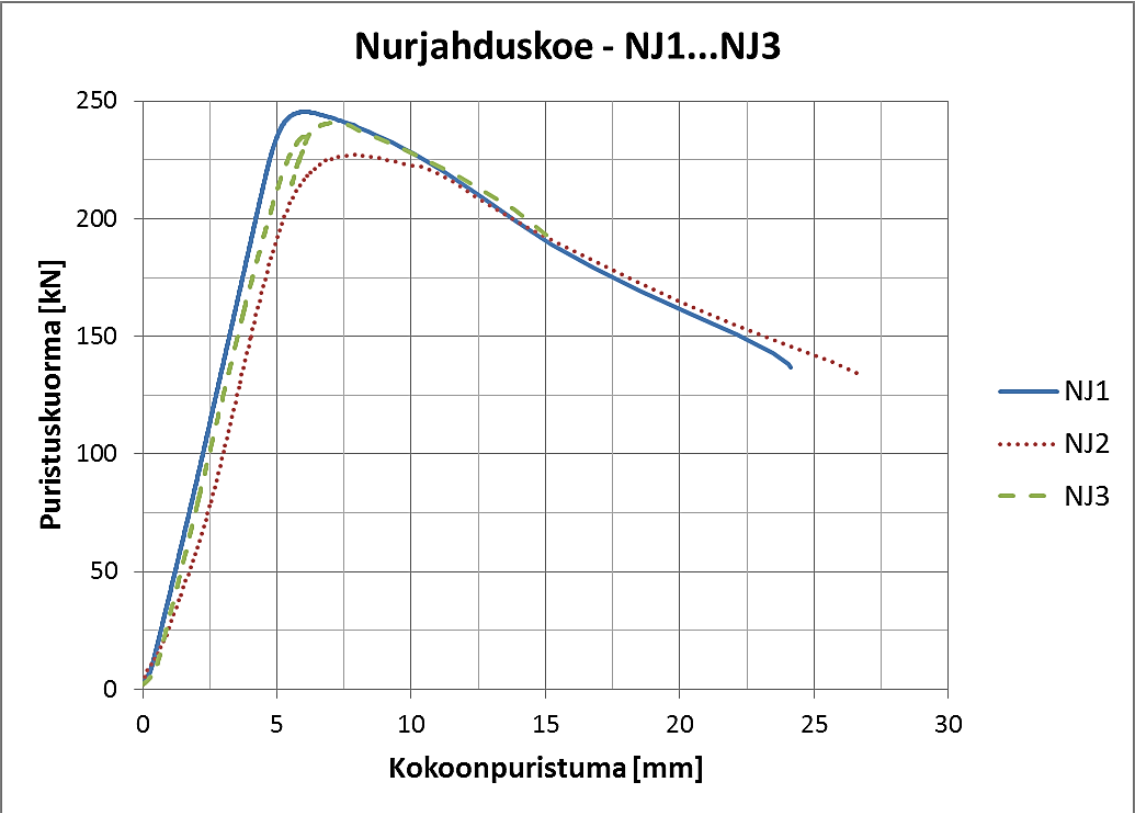
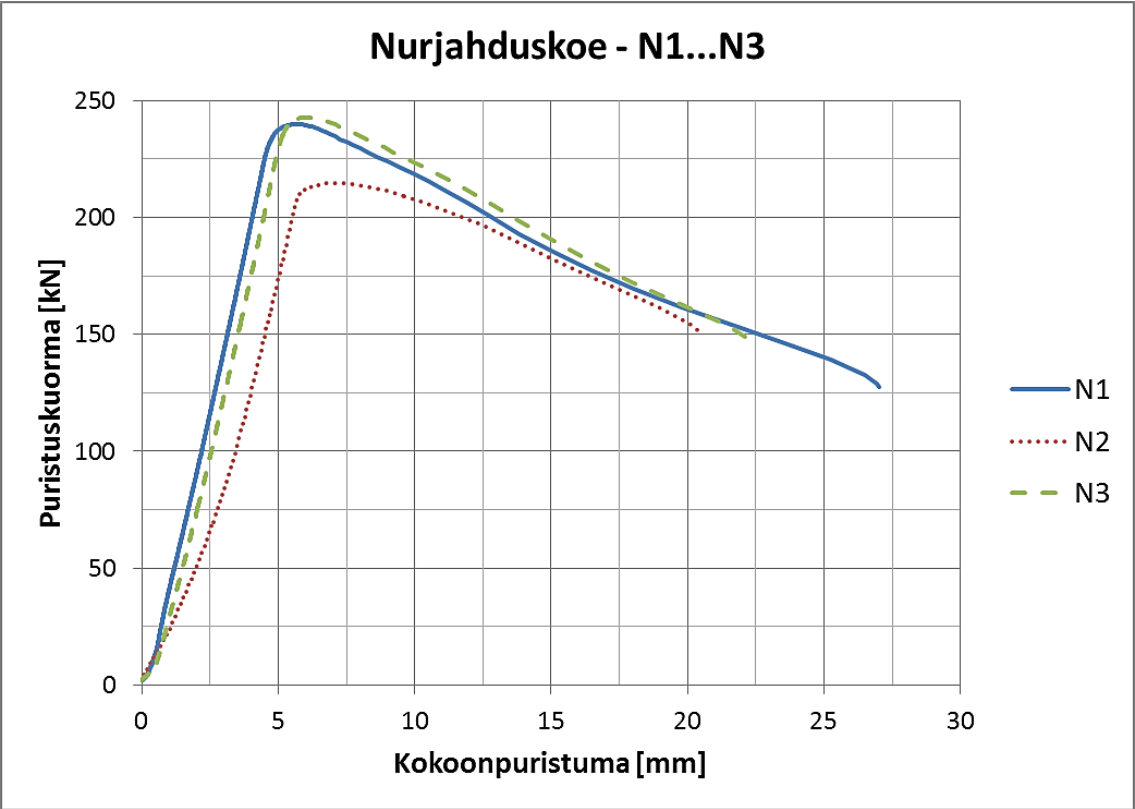


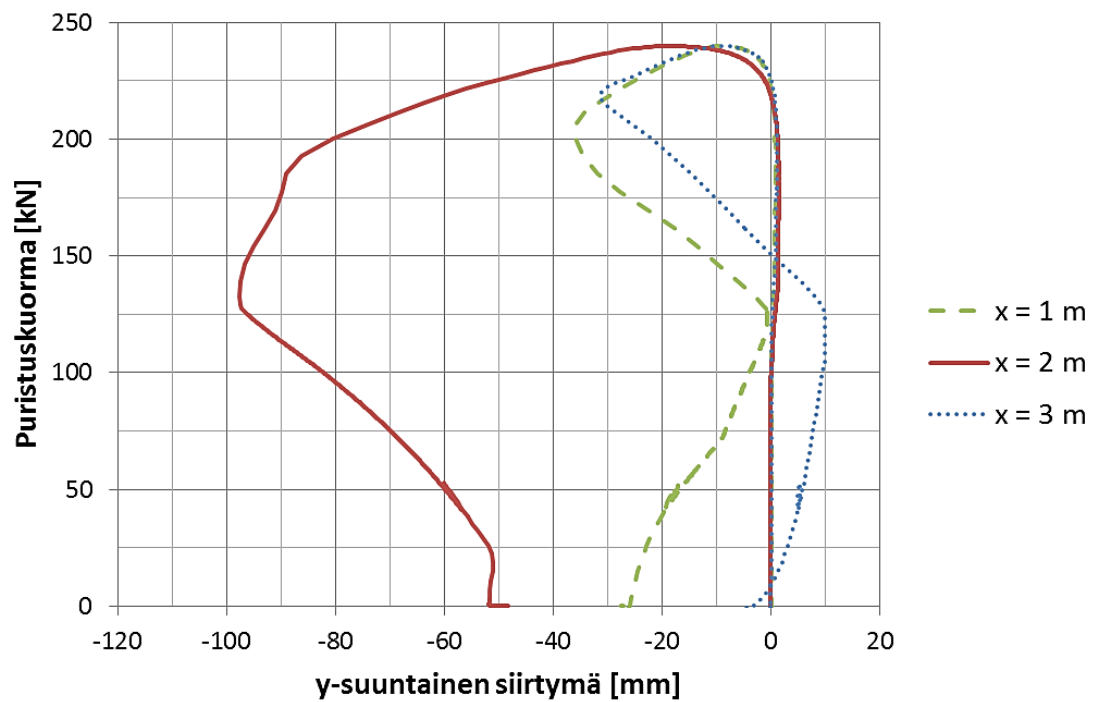
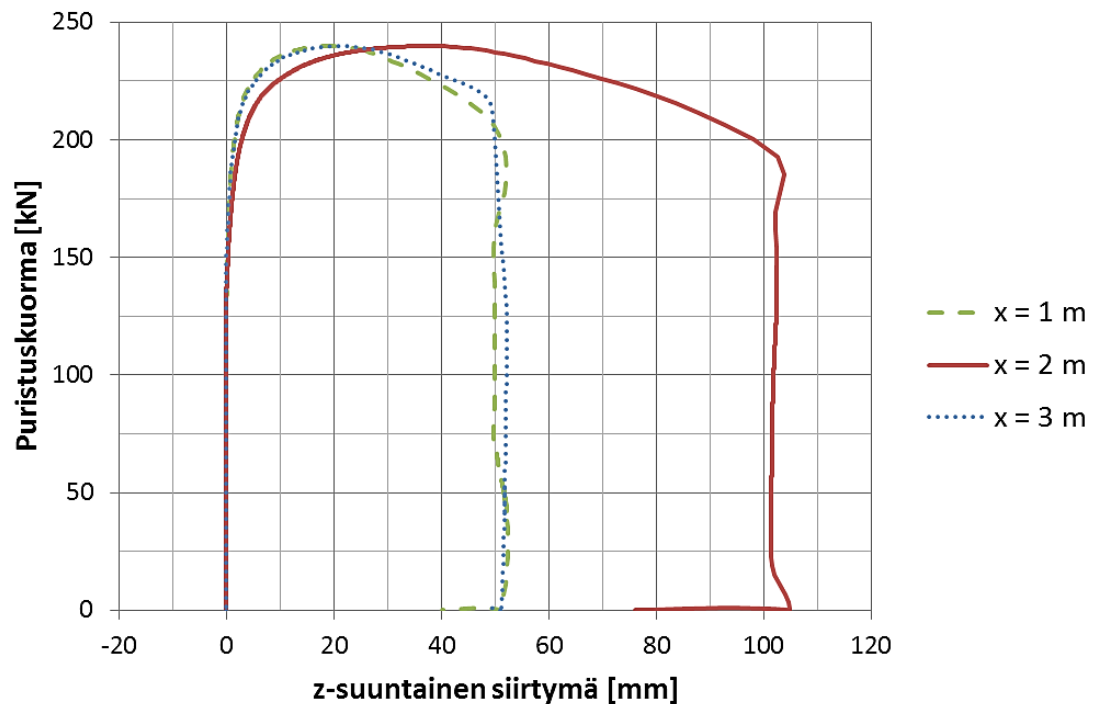
KOEUORMITUS:		Nurjahduskoe																				
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		NJ3																				
PÄIVÄMÄÄRÄ:		27.11.2013																				
MITTATIEDOT																						
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =																			
Massa m =	53 800	g	6913	g																		
Poikkipinta-ala A =	1495,9	mm ²	Varren osalla																			
PITUUS L =		3996 mm																				
<table border="1"> <tr> <td>1.</td> <td>3997</td> <td>4.</td> <td>3995</td> <td>7.</td> <td>3996</td> </tr> <tr> <td>2.</td> <td>3996</td> <td>5.</td> <td>3995</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3.</td> <td>3996</td> <td>6.</td> <td>3995</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					1.	3997	4.	3995	7.	3996	2.	3996	5.	3995			3.	3996	6.	3995		
1.	3997	4.	3995	7.	3996																	
2.	3996	5.	3995																			
3.	3996	6.	3995																			
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta																						
HALKAISIJA D =																						
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$																		
D1	93,1	94,8	94,0 mm	104,2 mm																		
D2	91,4	91,7	91,6 mm	107,1 mm																		
D3	90,2	92,2	91,2 mm	106,9 mm																		
D4	93,1	91,5	92,3 mm	106,8 mm																		
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti																						
SUORUUSPOIKKEAMA																						
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$	-1,5	mm	L/Δ	-0,0004																		
SuoruuSpoikkeama $\Delta 2$	-2,0	mm		-0,0005																		
SEINÄMÄN PAKSUUS t =		6,0 mm																				
	$x=0$	$x=L$	k_a																			
t1	6,0	6,1	6,1																			
t2	6,0	5,9	6,0																			
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä																						
HAHLON LEVEYS		25,0 mm																				
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$																			
	25,0	25,0	25,1																			
KATKOHITSIN MITTATIEDOT																						
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =		40 mm																				
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =		50 mm																				

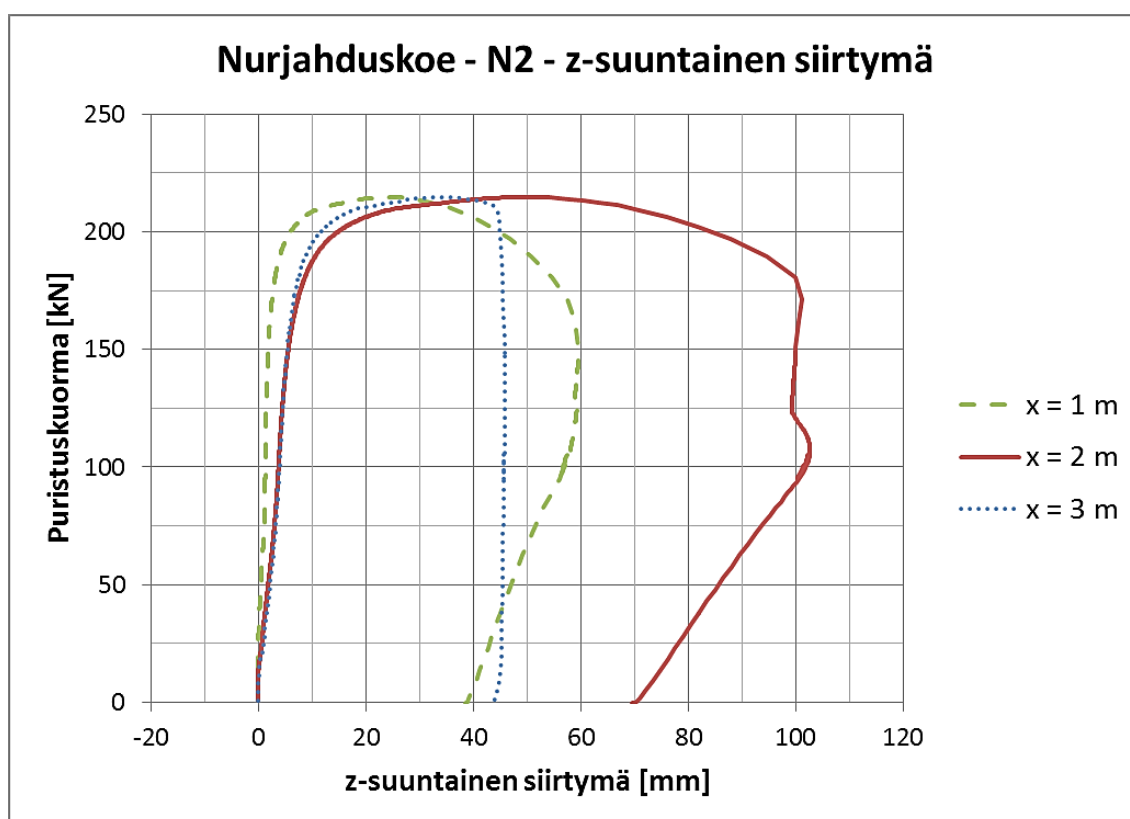
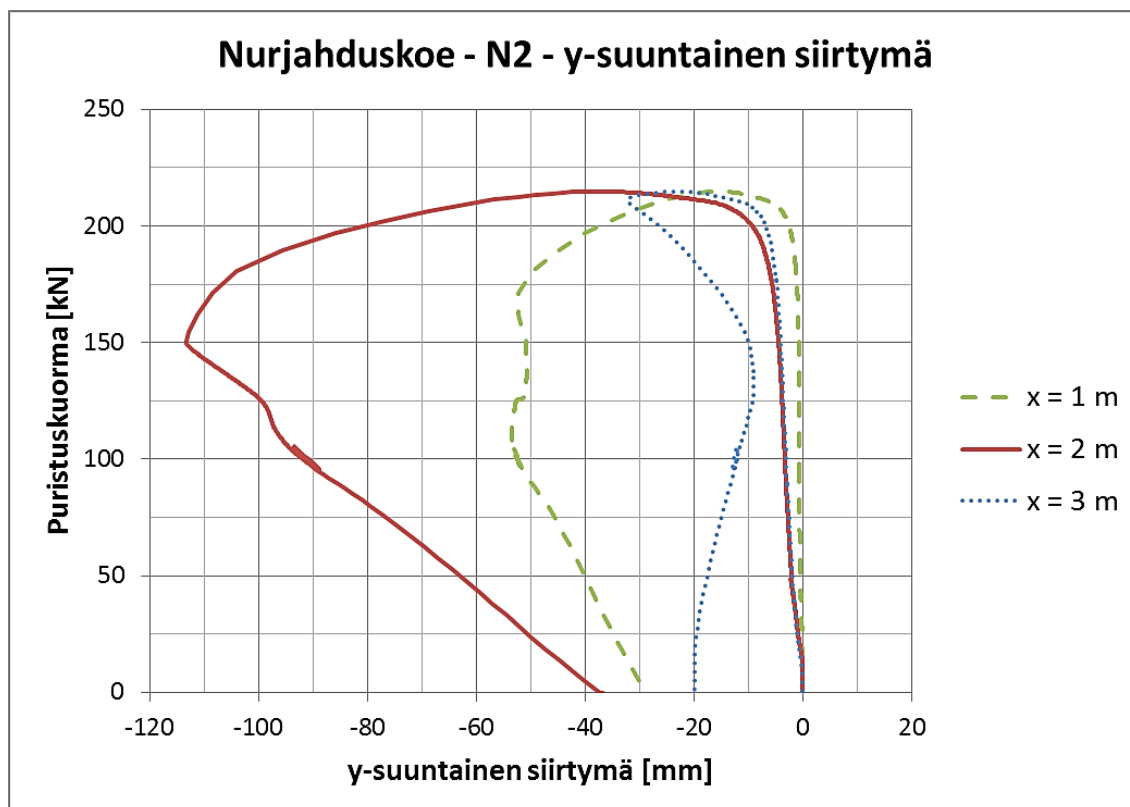
KOEUORMITUS:		Nurjahduskoe	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		NJ3	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		27.11.2013	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin		Tehdas-
Särmä	hitsi		hitsi
1.	25 mm	40	mm
2.	20 mm	25	mm
3.	20 mm	35	mm
4.	20 mm	35	mm
5.	20 mm	35	mm
6.	20 mm	30	mm
7.	25 mm	40	mm
SUMMA (I_w) =	150	240	
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä			
Tehdashitsi			
I _w .min =	20	mm	
e _w .max =	50	mm	

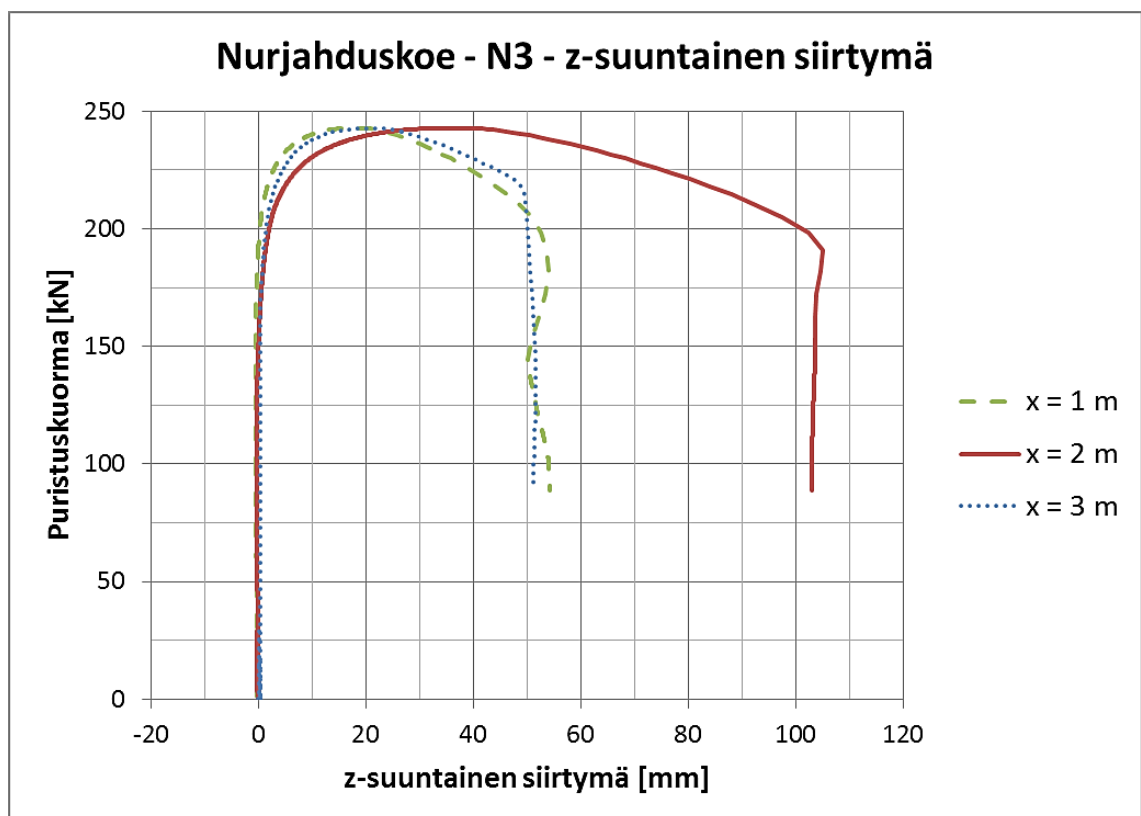
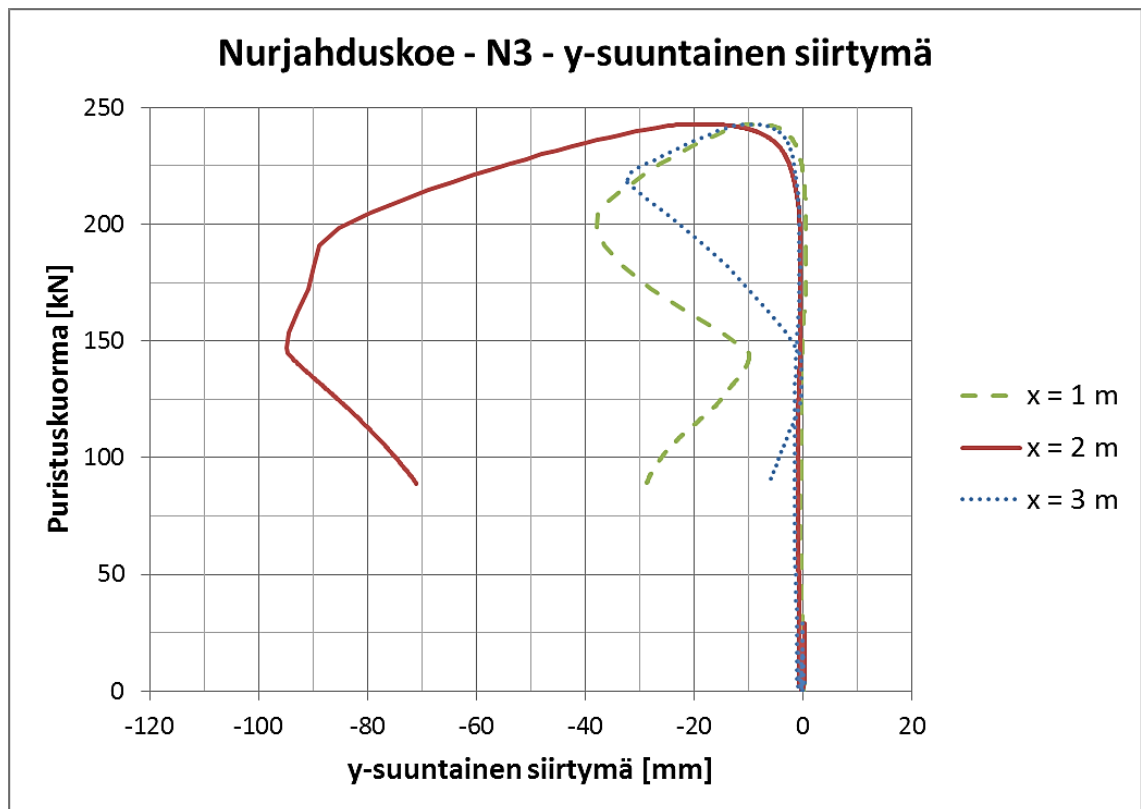


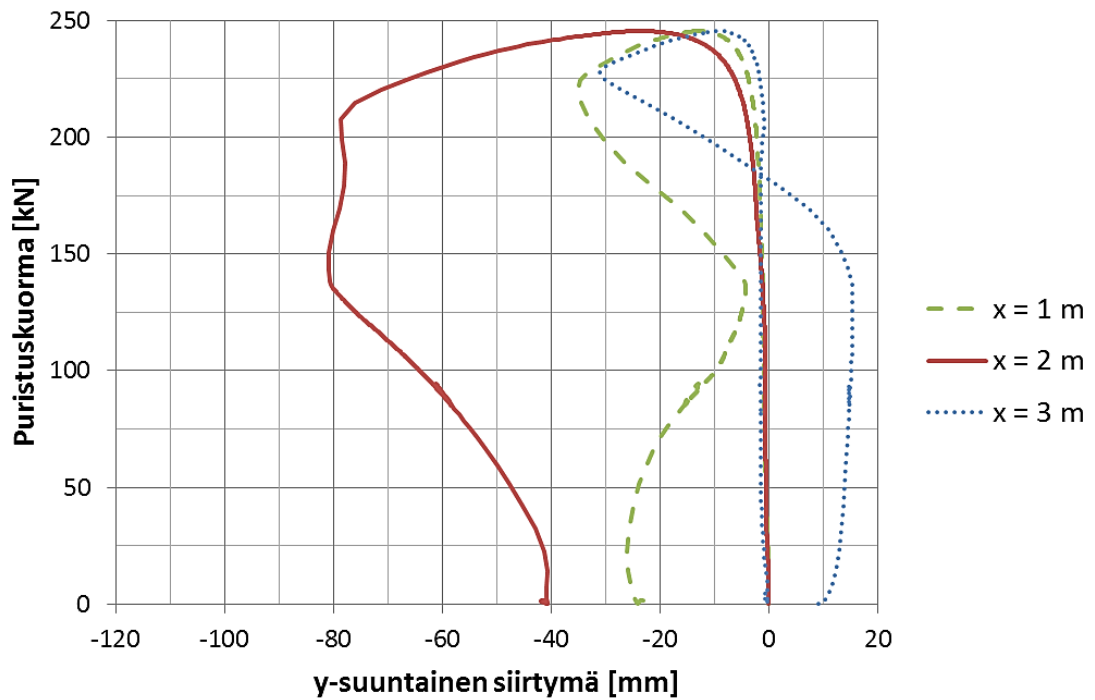
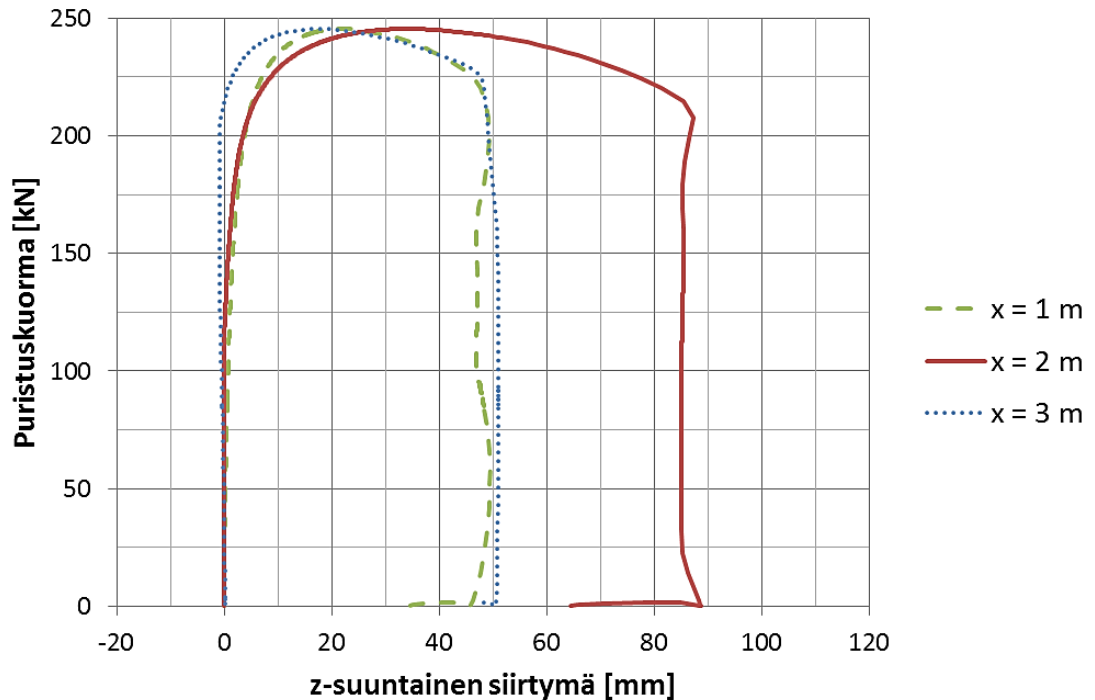
Liite 8. Nurjahduskokeiden mittaustulokset

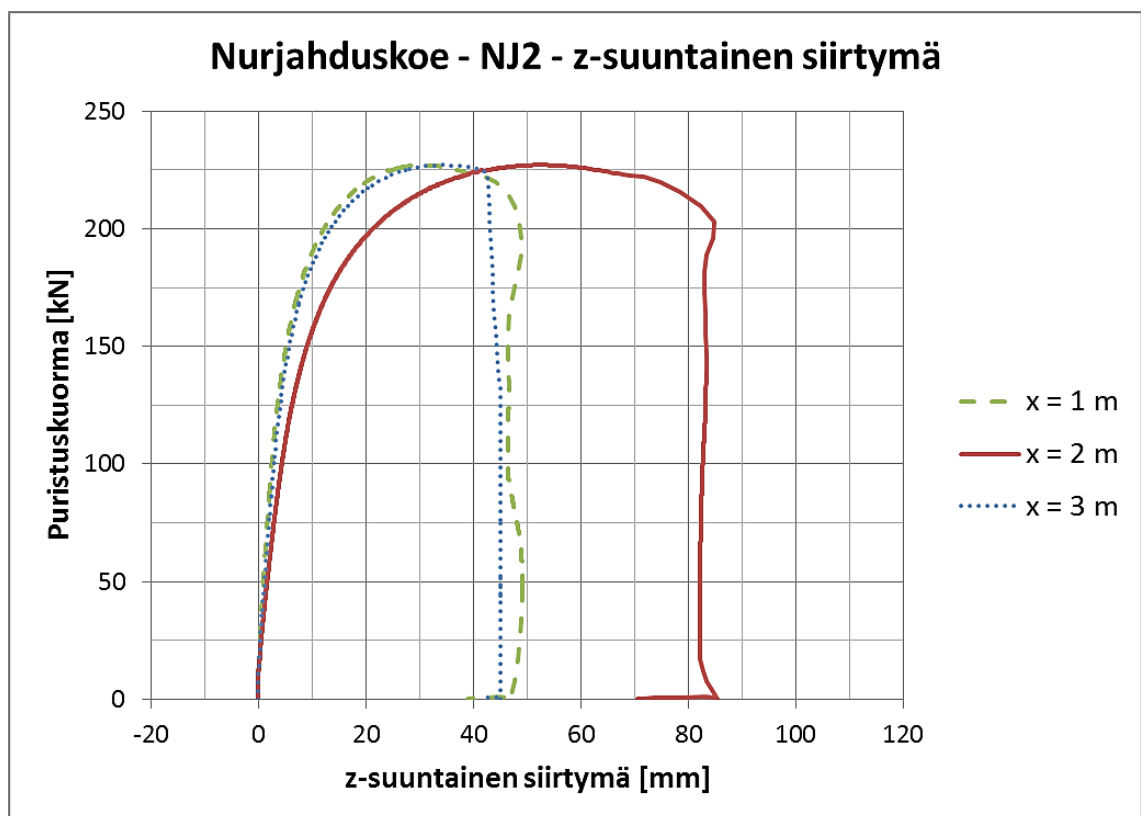
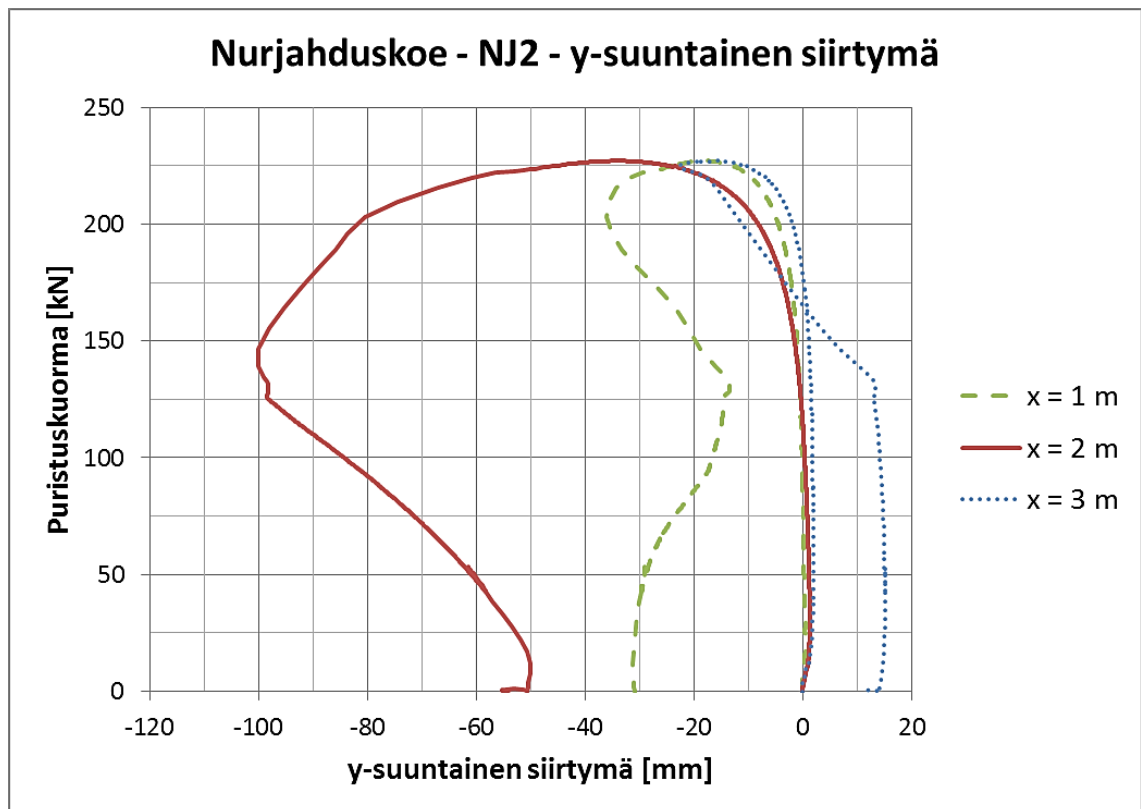


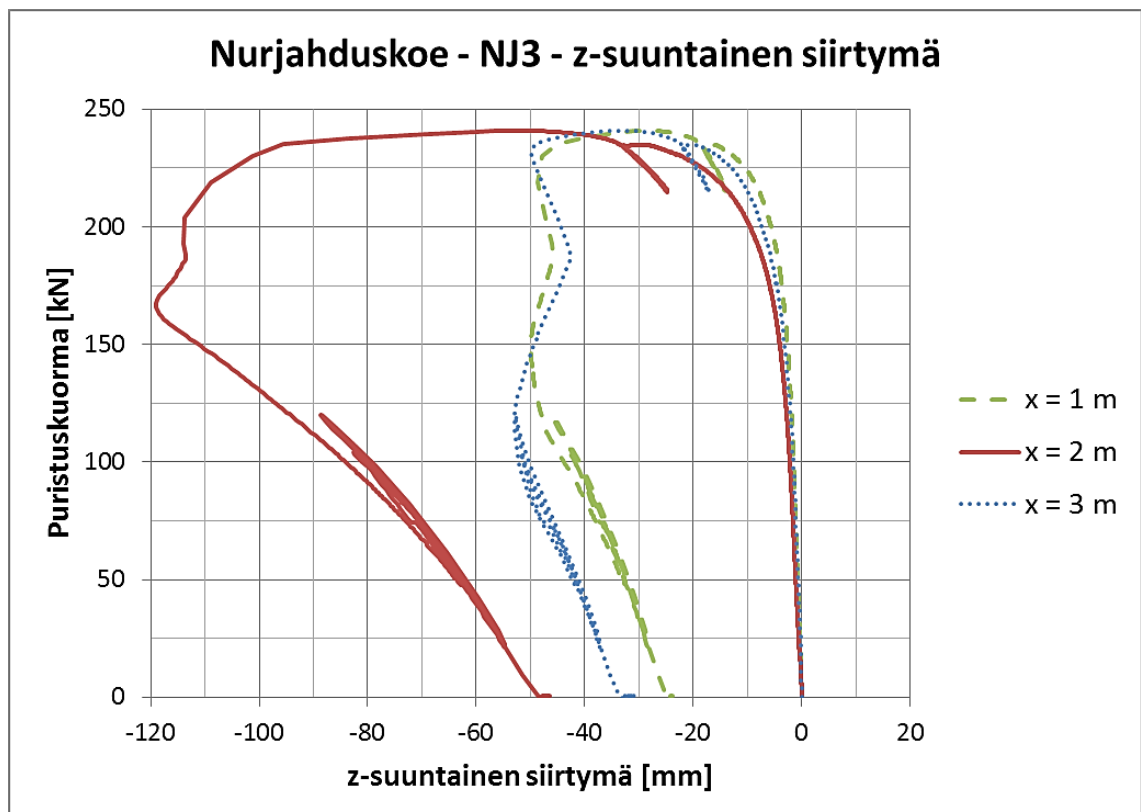
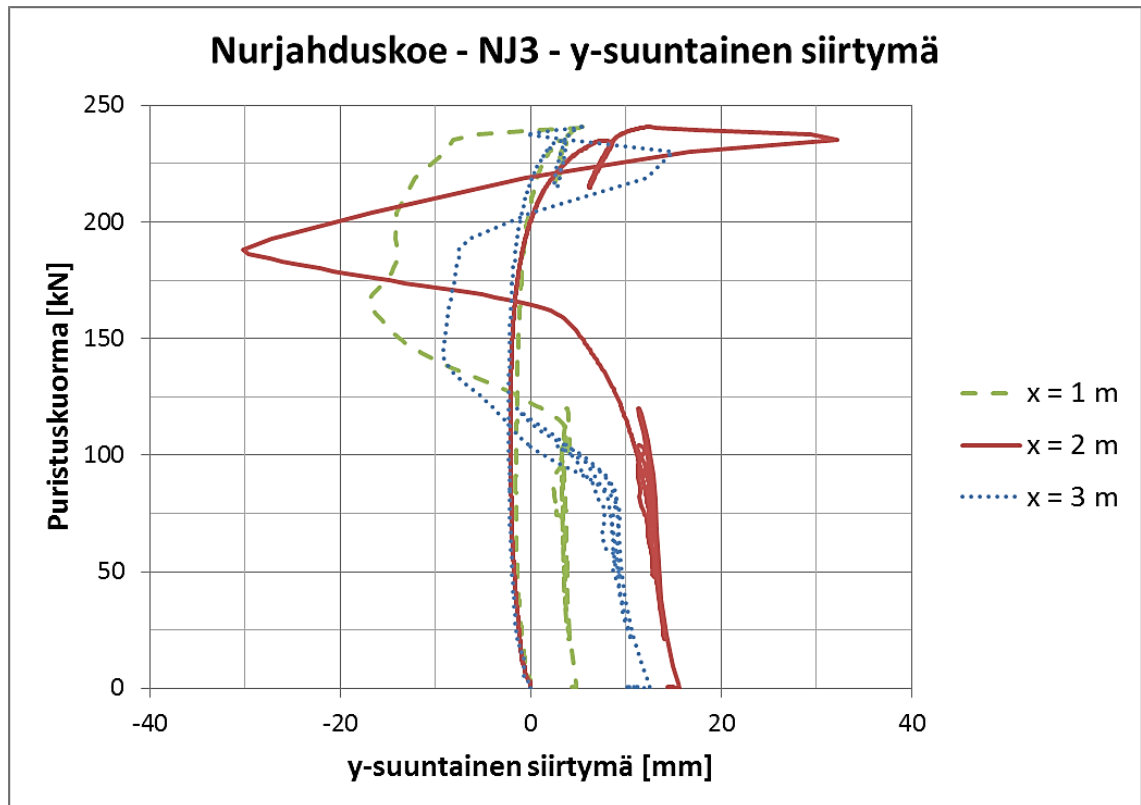
Nurjahduskoe - N1 - y-suuntainen siirtymä**Nurjahduskoe - N1 - z-suuntainen siirtymä**







Nurjahduskoe - NJ1 - y-suuntainen siirtymä**Nurjahduskoe - NJ1 - z-suuntainen siirtymä**





Liite 9. Jatkoksen puristuskokeiden koekappaleiden mittatiedot

KOEUORMITUS:		Jatkoksen puristuskoe																				
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		PJ1																				
PÄIVÄMÄÄRÄ:		10.1.2014																				
MITTATIEDOT																						
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =																			
Massa m =	18 550	g		6913 g																		
Poikkipinta-ala A =	1483,3	mm ²	Varren osalla																			
PITUUS L =			1000	mm																		
<table border="1"> <tr> <td>1.</td> <td>1000</td> <td>4.</td> <td>1001</td> <td>7.</td> <td>999</td> </tr> <tr> <td>2.</td> <td>1001</td> <td>5.</td> <td>1000</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3.</td> <td>1001</td> <td>6.</td> <td>999</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					1.	1000	4.	1001	7.	999	2.	1001	5.	1000			3.	1001	6.	999		
1.	1000	4.	1001	7.	999																	
2.	1001	5.	1000																			
3.	1001	6.	999																			
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta																						
HALKAISIJA D =																						
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$																		
D1	93,1	93,6	93,4 mm	104,1 mm																		
D2	91,5	91,2	91,4 mm	107,1 mm																		
D3	90,6	90,7	90,7 mm	106,6 mm																		
D4	92,2	92,2	92,2 mm	106,4 mm																		
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti																						
SUORUUSPOIKKEAMA																						
Suoruispoikkeama $\Delta 1$		mm	L/Δ	0,0000																		
Suoruispoikkeama $\Delta 2$		mm		0,0000																		
SEINÄMÄN PAKSUUS t =			6,0	mm																		
	$x=0$	$x=L$	k_a																			
t1	5,9	6,0	6,0																			
t2	6,0	6,1	6,1																			
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä																						
HAHLON LEVEYS			24,5	mm																		
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$																			
	25,1	24,2	24,3																			
KATKOHITSIN MITTATIEDOT																						
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =			45	mm																		
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =			60	mm																		

KOEUORMITUS:		Jatkoksen puristuskoe	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		PJ1	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		10.1.2014	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
HITSIN a-mitta:	4	mm	
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin	Tehdas-	
Särmä	hiksi	hiksi	
1.	20 mm	30 mm	
2.	18 mm	25 mm	
3.	15 mm	25 mm	
4.	17 mm	25 mm	
5.	20 mm	25 mm	
6.	19 mm	47 mm	
7.	18 mm	30 mm	
SUMMA (I_w) =	127	207	
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä			
Tehdashitsi			
I_w.min =	40 mm		
e_w.max =	50 mm		
LISÄTIETOJA			
Koekappaleen jatkoksen kontaktipinnan välinen rako mitattiin ennen koetta ja sen jälkeen.			
	ENNEN	JÄLKEEN	
Keskimääräinen rako	1,1 mm	0,7 mm	
Muuta:			
Kontaktipinta oli kokonaan raolla ja se kapeni toiselta puolelta hahloa arvosta 1,7 mm toiselle puolelle hahloa arvoon 0,5 mm			
			

KOEKUORMITUS:		Jatkoksen puristuskoe		
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		PJ2		
PÄIVÄMÄÄRÄ:		10.1.2014		
MITTATIEDOT				
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =	
Massa m =	18 500	g	6913	g
Poikkipinta-ala A =	1475,0	mm ²	Varren osalla	
PITUUS L =			1001	mm
1.	1001	4.	1002	7.
2.	1001	5.	1002	
3.	1002	6.	1001	
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta				
HALKAISIJA D =				
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$
D1	93,5	93,7	93,6 mm	104,7 mm
D2	91,4	91,6	91,5 mm	106,1 mm
D3	92,2	91,1	91,7 mm	106,5 mm
D4	91,9	92,5	92,2 mm	105,3 mm
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti				
SUORUUSPOIKKEAMA				
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$		mm	L/Δ	0,0000
SuoruuSpoikkeama $\Delta 2$		mm		0,0000
SEINÄMÄN PAKSUUS t =			6,1	mm
	$x=0$	$x=L$	k_a	
t1	6,1	6,0	6,1	
t2	6,1	6,1	6,1	
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä				
HAHLON LEVEYS			24,6	mm
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$	
	24,8	24,4	24,6	
KATKOHITSIN MITTATIEDOT				
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =			45	mm
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =			50	mm

KOEUORMITUS:		Jatkoksen puristuskoe	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		PJ2	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		10.1.2014	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
HITSIN a-mitta:	4	mm	
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin		Tehdas-
Särmä	hiksi		hiksi
1.	18	mm	30 mm
2.	20	mm	25 mm
3.	18	mm	25 mm
4.	16	mm	25 mm
5.	18	mm	25 mm
6.	15	mm	25 mm
7.	18	mm	30 mm
SUMMA (I_w) =	123		185
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä			
Tehdashitsi			
I_w.min =	35	mm	
e_w.max =	50	mm	
LISÄTIETOJA			
Koekappaleen jatkoksen kontaktipinnan välinen rako mitattiin ennen koetta ja sen jälkeen.			
	ENNEN		JÄLKEEN
Keskimääräinen rako	0,9	mm	0,4 mm
Muuta:			
Kontaktipinta oli hahlon toisella reunalla 0,9mm raolla, keskellä paalua 1,8mm ja hahlon toisella reunalla 0mm.			



KOEKUORMITUS:		Jatkoksen puristuskoe			
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		PJ3			
PÄIVÄMÄÄRÄ:		10.1.2014			
MITTATIEDOT					
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =		
Massa m =	18 550	g	6913	g	
Poikkipinta-ala A =	1478,8	mm ²	Varren osalla		
PITUUS L =			1003	mm	
1.	1004	4.	1003	7.	1003
2.	1003	5.	1003		
3.	1003	6.	1003		
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta					
HALKAISIJA D =					
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$	
D1	94,1	94,2	94,2 mm	104,9 mm	
D2	91,9	92,8	92,4 mm	107,9 mm	
D3	91,8	91,7	91,8 mm	108,4 mm	
D4	91,9	91,7	91,8 mm	105,6 mm	
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti					
SUORUUSPOIKKEAMA					
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$		mm	L/Δ	0,0000	
SuoruuSpoikkeama $\Delta 2$		mm		0,0000	
SEINÄMÄN PAKSUUS t =			5,9	mm	
	$x=0$	$x=L$	k_a		
t1	5,9	5,9	5,9		
t2	6,0	5,9	6,0		
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä					
HAHLON LEVEYS			25,4	mm	
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$		
	25,3	25,5	25,5		
KATKOHITSIN MITTATIEDOT					
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =			30	mm	
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =			60	mm	



KOEUORMITUS:		Jatkoksen puristuskoe	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		PJ3	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		10.1.2014	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
HITSIN a-mitta:	4	mm	
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin	Tehdas-	
Särmä	hiksi	hiksi	
1.	22 mm	20 mm	
2.	20 mm	30 mm	
3.	21 mm	25 mm	
4.	21 mm	28 mm	
5.	20 mm	30 mm	
6.	20 mm	20 mm	
7.	20 mm	30 mm	
SUMMA (I_w) =	144	183	
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä			
Tehdashitsi			
I_w.min =	25 mm		
e_w.max =	60 mm		
LISÄTIETOJA			
Koekappaleen jatkoksen kontaktipinnan välinen rako mitattiin ennen koetta ja sen jälkeen.			
	ENNEN	JÄLKEEN	
Keskimääräinen rako	0,4 mm	0,2 mm	
Muuta:			
0,4 mm rako tasaisesti koko jatkoksessa ennen kokeen alkua.			



Liite 10. Jatkoksen vetokokeiden koekappaleiden mittatiedot

KOEUORMITUS:		Jatkoksen vetokoe																				
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		VJ1																				
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.1.2014																				
MITTATIEDOT																						
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =																			
Massa m =	17 300	g	6913	g																		
Poikkipinta-ala A =	1471,5	mm ²	Varren osalla																			
PITUUS L =			900	mm																		
<table border="1"> <tr> <td>1.</td> <td>900</td> <td>4.</td> <td>900</td> <td>7.</td> <td>900</td> </tr> <tr> <td>2.</td> <td>900</td> <td>5.</td> <td>899</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3.</td> <td>900</td> <td>6.</td> <td>900</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					1.	900	4.	900	7.	900	2.	900	5.	899			3.	900	6.	900		
1.	900	4.	900	7.	900																	
2.	900	5.	899																			
3.	900	6.	900																			
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta																						
HALKAISIJA D =																						
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$																		
D1	93,1	93,1	93,1	104,0																		
D2	91,6	91,8	91,7	107,2																		
D3	90,9	90,7	90,8	106,6																		
D4	92,1	92,6	92,4	105,9																		
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti																						
SUORUUSPOIKKEAMA																						
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$		mm	L/Δ	0,0000																		
SuoruuSpoikkeama $\Delta 2$		mm		0,0000																		
SEINÄMÄN PAKSUUS t =			6,0	mm																		
	$x=0$	$x=L$	k_a																			
t1	6,0	5,9	6,0																			
t2	6,1	6,1	6,1																			
Kappaleen molempien teräslevyjien paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä																						
HAHLON LEVEYS			25,1	mm																		
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$																			
	24,9	24,5	25,9																			
KATKOHITSIN MITTATIEDOT																						
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =			30	mm																		
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =			40	mm																		

KOEUORMITUS:		Jatkoksen vetokoe	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		VJ1	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.1.2014	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
HITSIN a-mitta:	4	mm	
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin	Tehdas-	
Särmä	hiksi	hiksi	
1.	15	35	mm
2.	15	25	mm
3.	16	28	mm
4.	16	25	mm
5.	16	25	mm
6.	17	25	mm
7.	17	27	mm
SUMMA (l_w) =	112	190	
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä			
Tehdashitsi			
l_w.min =	40	mm	
e_w.max =	35	mm	



KOEUORMITUS:		Jatkoksen vetokoe			
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		VJ2			
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.1.2014			
MITTATIEDOT					
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =		
Massa m =	17 350	g	6913	g	
Poikkipinta-ala A =	1476,9	mm ²	Varren osalla		
PITUUS L =		901		mm	
1.	901	4.	900	7.	902
2.	901	5.	901		
3.	900	6.	901		
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta					
HALKAISIJA D =					
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$	
D1	94,3	94,3	94,3	105,0	
D2	91,2	91,8	91,5	106,2	
D3	90,9	91,3	91,1	105,3	
D4	91,9	92,4	92,2	105,2	
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti					
SUORUUSPOIKKEAMA					
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$		mm	L/Δ	0,0000	
SuoruuSpoikkeama $\Delta 2$		mm		0,0000	
SEINÄMÄN PAKSUUS t =		6,0 mm			
	$x=0$	$x=L$	k_a		
t1	6,0	5,9	6,0		
t2	6,0	6,0	6,0		
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä					
HAHLON LEVEYS		25,3 mm			
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$		
	25,2	25,0	25,6		
KATKOHITSIN MITTATIEDOT					
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =			45	mm	
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =			35	mm	

KOEUORMITUS:		Jatkoksen vetokoe	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		VJ2	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.1.2014	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
HITSIN a-mitta:	4	mm	
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin		Tehdas-
Särmä	hiksi		hiksi
1.	18	mm	30
2.	20	mm	25
3.	18	mm	25
4.	21	mm	25
5.	20	mm	25
6.	20	mm	22
7.	20	mm	30
SUMMA (l_w) =	137		182
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä			
Tehdashitsi			
l_w.min =	40	mm	
e_w.max =	40	mm	



KOEUORMITUS:		Jatkoksen vetokoe			
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		VJ3			
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.1.2014			
MITTATIEDOT					
Tiheys ρ =	7844,3	kg/m ³	Jatkoksen massa =		
Massa m =	17 350	g	6913	g	
Poikkipinta-ala A =	1478,4	mm ²	Varren osalla		
PITUUS L =		900		mm	
1.	900	4.	900	7.	900
2.	900	5.	900		
3.	900	6.	900		
Kappaleen pituus mitataan kaikilta 7 sivulta					
HALKAISIJA D =					
	$x=0$	$x=L$	k_a	Jatkos $x=L/2$	
D1	93,9	94,4	94,2 mm	104,8 mm	
D2	91,0	91,7	91,4 mm	106,6 mm	
D3	90,5	90,4	90,5 mm	105,9 mm	
D4	91,9	92,4	92,2 mm	105,5 mm	
Kappaleen halkisijat mitataan kuvan mukaisesti					
SUORUUSPOIKKEAMA					
SuoruuSpoikkeama $\Delta 1$		mm	L/Δ	0,0000	
SuoruuSpoikkeama $\Delta 2$		mm		0,0000	
SEINÄMÄN PAKSUUS t =		6,0 mm			
	$x=0$	$x=L$	k_a		
t1	6,0	6,0	6,0		
t2	5,9	6,0	6,0		
Kappaleen molempien teräslevyjen paksuudet mitataan alku- ja loppupäästä					
HAHLON LEVEYS		24,8 mm			
	$x=0$	$x=L/2$	$x=L$		
	24,7	24,8	25,0		
KATKOHITSIN MITTATIEDOT					
Katkohitsin minimipituus, $l_{w.min}$ =		40 mm			
Katkohitsin maksimiväli, $e_{w.max}$ =		50 mm			

KOEUORMITUS:		Jatkoksen vetokoe	
KOEKAPPALEEN TUNNUS:		VJ3	
PÄIVÄMÄÄRÄ:		23.1.2014	
JATKOKSEN HITSIN MITTATIEDOT			
HITSIN a-mitta:	4	mm	
SÄRMIEN KOHDALLA:			
	Koehallin		Tehdas-
Särmä	hiksi		hiksi
1.	14	mm	37
2.	17	mm	25
3.	18	mm	30
4.	15	mm	20
5.	16	mm	35
6.	17	mm	25
7.	19	mm	35
SUMMA (l_w) =	116		207
JATKOKSEN PITUUSSUUNTAINEN HITSI			
Koehallin hitsi			
40 mm hitsit jatkoksen alku- ja loppupäässä			
Tehdashitsi			
l_w.min =	30	mm	
e_w.max =	50	mm	

Liite 11. Epäkeskeisen kuorman vaikutus nurjahduskestävyyteen

